Die

Schule der Mechanik.

Für den Selbstunterricht,

besonders des

praktischen Mechanikers und Handwerkers,

sowie

für den Gebrauch an technischen Lehranstalten

gemeinfasslich dargestellt

und mit Zugrundlegung von Delaunay's „Elementarlehrbuch der theoretischen und angewandten Mechanik"

bearbeitet

von

J. Bauschinger,
Professor am k. Realgymnasium in München.

BIBLIOTHECA CIVITATIS BABENBERGENSIS.

Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage.

Mit 636 Holzschnitten.

München.
R. Oldenbourg.
1866.

Vorwort.

Die baldige Folge der hiemit vorliegenden zweiten auf die ungewöhnlich starke erste Auflage der „Schule der Mechanik“ gibt mir die Ueberzeugung, dass der darin eingeschlagene Weg, die Lehren der Mechanik einem grösseren Leserkreis zugänglich zu machen, der richtige ist. Bei einer Vergleichung der neuen Auflage mit der alten wird man gleichwohl nicht verkennen, dass ich überall, wo es mir nöthig schien, verbessert, ergänzt und, so weit dies in einem Buche wie das vorliegende möglich ist, die neuesten Fortschritte der Technik berücksichtiget habe. Die Abschnitte über das Gleichgewicht und die Bewegung fester Körper wurden fast ganz umgearbeitet und dabei besonders von dem grösstentheils neu aufgenommenen Kapitel über die „Arbeit“ ausgegangen. Die Lehre von der Zusammensetzung und vom Gleichgewicht der Kräfte wurde dabei auf eine, soviel mir bekannt, zum Theil neue Art ganz allgemein und streng durchgeführt, ohne, wie ich glaube, der Allgemeinverständlichkeit geschadet zu haben. Diese Eigenschaft suchte ich dem Buche auch da zu wahren, wo ich es unternahm, in den Abschnitten über die Bewegung fester Körper auch die schwierigeren Kapitel der Mechanik dem Verständniss des Lesers nahe zu führen. — Der Anhang zur I. Abtheilung: „Von der Festigkeit der Materialien“ ist ebenfalls neu hinzu gekommen.

Durch Aufnahme der Formeln wollte ich den, wie mir schien berechtigten, Wünschen eines Theils des Publikums nachkommen und zugleich dem Buche eine erhöhte Brauchbarkeit in der Schule geben. Um jedoch denjenigen Lesern, deren Kenntnisse in der Mathematik nicht so weit gehen, um den hiebei nöthigen Ausführungen folgen zu können, die Benützung des Buches doch nicht zu erschweren oder gar unmöglich zu machen, so sind jene Stellen mit kleinerer Schrift gedruckt und so eingefügt worden, dass sie ohne Bedenken übergangen werden können, ohne dass dadurch der Zusammenhang und die Verständlichkeit der übrigen Theile im mindesten beeinträchtigt würden.

Durch strenge Beschränkung in anderen, minder wichtigen Theilen ist es möglich geworden, diese Erweiterungen durchführen zu können, ohne den Umfang des Buches bedeutend vergrössern zu müssen. Die Zahl der Holzschnitte ist im Ganzen zwar nur um 24 gestiegen; neu geschnitten aber wurden 90. Trotzdem will die Verlagshandlung den Preis der zweiten Auflage noch bedeutend niedriger stellen, als der der ersten war. Möge sie dabei in ihrer Erwartung, dass sich jene einer gleich günstigen, ja noch einer wärmeren Aufnahme erfreuen werde wie diese nicht getäuscht werden.

München, im September 1866.

J. Bauschinger.

Inhalts-Verzeichniss.

Einleitung.

§.		Seite
1.	Mechanik, Maschinen	1
2.	Ausdehnung	2
3.	Ausdehnbarkeit und Zusammendrückbarkeit	3
4.	Theilbarkeit	7
5.	Porosität	8
6.	Aggregatzustände der Körper	10
7.	Feste Körper	10
8.	Tropfbar flüssige Körper oder nicht zusammendrückbare Flüssigkeiten	11
9.	Gase oder elastische Flüssigkeiten	12

Erste Abtheilung.

Die Grundlehren der Mechanik im Allgemeinen und der Mechanik fester Körper im Besonderen.

I. Vorbegriffe.

Erste Begriffe von der Bewegung.

§.		Seite
10.	Ruhe und Bewegung	13
11.	Weg, Arten der Bewegung	15
12.	Zeit	18
13.	Gleichförmige Bewegung, Geschwindigkeit	18
14.	Gleichförmig periodische Bewegung, mittlere Geschwindigkeit	20
15.	Ungleichförmige Bewegung, mittlere Geschwindigkeit	21
16.	Rotationsbewegung, Winkelgeschwindigkeit	24
17.	Zusammensetzung mehrerer gleichzeitiger Bewegungen	27
18.	Relative oder scheinbare und absolute Bewegung	32

Erste Begriffe von den Kräften.

§.		Seite
19.	Gesetz der Trägheit	35
20.	Kräfte	36
21.	Druck und Zug, Spannung	39
22.	Gewicht	39
23.	Maass der Kräfte, Dynamometer	41
24.	Richtung und Angriffspunkt einer Kraft	46

§. Seite

25. Princip der gleichen Wirkung u. Gegenwirkung. Starre Körper 47
26—30. Arbeit der Kräfte 48
31. Registrirende Dynamometer . . 56
32. Totalisirende Dynamometer . . 57
33. Mittlere Grösse einer Kraft . . 57
34. Pferdekraft 58
35. Fall, wo das Bewegte eine krumme Linie beschreibt . . 61
36. Bedingungen für die Berechnung der Arbeit in der bisherigen Weise 61
37. Fall, wo die Kraft nicht in der Richtung des durchlaufenen Weges wirkt 62
38. Bewegungsarbeit, Widerstandsarbeit 65
39. Allgemeinster Fall der Bestimmung der Arbeit einer Kraft . . 66
40. Gleichgewicht 67
41. Stabiles und labiles Gleichgewicht 68
42. Statik, Dynamik 69

II. Zusammensetzung und Zerlegung der Kräfte. Statik.

§. Seite

43. Mittelkraft, Seitenkräfte . . . 69
44. Kräfte, deren Richtungen sämmtlich in die nämliche gerade Linie fallen 70
45—49. Parallele Kräfte 72
50—54. Kräfte, welche nach verschiedenen Richtungen hin an einem und demselben Angriffspunkt wirken; Kräfteparallelogramm 78
55—57. Kräfte, welche nach verschiedenen Richtungen hin an verschiedenen Stellen eines Körpers wirken 87
58. Allgemeine Gleichgewichtsbedingungen 94

III. Vom Schwerpunkt.

§. Seite

59. Begriff des Schwerpunkts . . 100
60. Bestimmung des Schwerpunkts eines Körpers durch d. Versuch 101
61. Schwerpunkt eines homogenen Körpers, der einen Mittelpunkt hat 103
62. Schwerpunkt einer ebenen Fläche 104
63. Schwerpunkt eines Körpers, der aus mehreren Theilen besteht 105
64. Gleichgewicht eines schweren Körpers, welcher auf einer horizontalen Ebene aufruht . 109
65—66. Druck eines Körpers gegen seine Unterstützungspunkte . 111
67. Gleichgewicht eines schweren Körpers, welcher sich blos um eine horizontale Achse drehen kann 115

IV. Betrachtung einiger Maschinen unter dem Gesichtspunkt des Gleichgewichts der Kräfte, welche auf sie wirken.

§. Seite

68—70. Der Hebel 116
71. Standfestigkeit 122
72. Die Waage 125
73—74. Empfindlichkeit einer Waage 128
75. Die Brückenwaage 133
76. Die Schnellwaage 136
77. Die Zeigerwaage 137
78. Die Rolle 138
79. Der Flaschenzug 140

§. Seite
80. Das Rad an der Welle . . . 141
81. Der Haspel oder die Winde . 143
82. Die Erdwinde 144
83. Das Sprossenrad 146
84. Der Riemen ohne Ende . . 148
85—86. Zahnräder oder Verzahnungen 152
87. Die Wagenwinde 157
88. Der Hebebock 159
89—90. Der Krahn 162
91—92. Die schiefe Ebene . . . 170
93. Das Haquet 174
94—95. Die Schraube 176
96. Der Keil 181
97—98. Gleichgewicht von Kräften an Seilen oder Ketten; Seilpolygon 183
99. Kettenbrücken 188
100. Gleichgewicht der Kräfte an Holzverbindungen 192

V. Betrachtung der Maschinen im Zustande der gleichförmigen Bewegung.

§. Seite
101—104. Die Bewegungsarbeit ist gleich der Widerstandsarbeit 195
105. Die Schraubenpresse . . . 204
106. Schraube ohne Ende . . . 206
107. Die Differentialwinde und der Differentialflaschenzug . . . 206
108. Die Roberval'sche Waage. Die Klingenfeld'sche Tafelwaage 210

VI. Erzeugung und Veränderung der Bewegung durch die Kräfte.

§. Seite
1) Fortschreitende Bewegung.
109. Fortschreitende Bewegung . 213
110. Fall der Körper 214
111. Galilei's schiefe Ebene . . . 217
112. Die Atwood'sche Fallmaschine 218
113—117. Gesetze des Falles der Körper 221
118. Der Morin'sche Apparat . . 232
119—121. Bewegende Kraft . . . 235
122. Masse eines Körpers, Grösse der bewegenden Kraft . . . 240
123. Bewegungsgrösse eines Körpers und Antrieb einer Kraft 241
124—125. Lebendige Potenz und Arbeit 244
126—127. Fortschreitende Bewegung eines Körpers im Allgemeinen 249
128—132. Normalkraft, Centripetalkraft, Centrifugalkraft . . 253
133. Bewegung eines schweren Körpers auf einer schiefen Ebene 267
134. Bewegg. eines schweren Körpers auf einer krummen Linie 269
135—138. Das Pendel 272
139—142. Bewegung geworfener Körper 282
143—144. Bewegung der Himmelskörper 292
2) Drehende Bewegung um eine feste Achse.
145. Mittelpunkt des Stosses . . 298
146. Trägheitsmoment 301
147. Schwungradius 305
148. Schwingungsmittelpunkt; reducirte Länge des zusammengesetzten Pendels 306
149—150. Mitwirkung der Centrifugalkraft bei der Drehung . 307
3) Allgemeine Bewegung.
151. D'Alembert'sches Princip . . 309
152. Princip der Erhaltung der lebendigen Potenz 310
153. Princip der Erhaltung der Bewegung des Schwerpunkts . 311

VII. Fortpflanzung der Bewegung.

§. Seite

154. Fortpflanzung der Bewegung in den Körpern 314
155—160. Vom Stoss zweier Körper 316
161. Stoss zwischen Körpern, welche sich um feste Achsen drehen. Ballistisches Pendel 331
162—163. Besondere Wirkungen des Stosses 335

VIII. Von den passiven Widerständen.

§. Seite

164. Die passiven Widerstände . 338
165—167. Reibung 339
168. Widerstand des Rollens . . 346
169. Steifigkeit der Seile 349
170. Widerstand des Mittels . . 350

IX. Betrachtung der Maschinen im Zustande der ungleichförmigen Bewegung.

§. Seite

171—172. Ursachen der ungleichförmigen Bewegung . . . 352
173. Das Schwungrad 355
174. Der Centrifugalregulator . . 358
175. Uebertragung der Arbeit in einer Maschine 361
176. Wirkung des Schwungrads bei der Uebertragung der Arbeit 364
177. Einfluss der passiven Widerstände 365
178—180. Mittel um den Einfluss der passiven Widerstände zu vermindern 368
181—183. Mittel um den Einfluss der passiven Widerstände zu vermehren 374
184. Verlust an Arbeit durch den Stoss 380
185. Das Carnot'sche Princip . . 383
186. Allgem. Schlussfolgerungen aus dem Vorhergehenden . 384

X. Anwendung der vorhergehenden Lehren auf die Betrachtung einiger Maschinen.

§. Seite

187—188. Mahlmühlen 385
189—190. Sägewerke 392
191—194. Hammerwerke 398
195. Stampf oder- Pochwerke . . 403
196—197. Rammen 406
198—199. Prägmaschinen . . . 412
200—205. Anfertigung der Geschützrohre; Geschütze und Laufbohrmaschinen 422
206—221. Die Uhren 431

XI. Einiges über den Transport von Lasten.

§. Seite

222. Transport von Lasten 463
223. Direkter Transport durch Menschen oder Thiere . . . 464
224. Transport durch Gleiten . . 465
225. Transport durch Wälzen . . 466
226. Transport auf Rädern . . . 467
227. Standfestigkeit der Wägen . 469
228. Zugkraft, welche zur Fortbewegung eines Wagens erforderlich ist 471
229. Transport auf geneigter Bahn 473
230—238. Eisenbahnen 476
239. Selbstwirkende schiefe Ebenen 502
240. Drops 504

XII. Allgemeine Betrachtungen über die Motoren.

§.	Seite
241—242. Allgemeine Betrachtungen über die Motoren	507
243. Das Bremsdynanometer	510
244—245. Thierische Motoren	514
246—247. Perpetuum mobile	520

Anhang.

Von der Festigkeit der Materialien.

§.	Seite
248. Formveränderung der Körper durch die Kräfte	525
249. Ausdehnung stabförm. Körper	526
250. Absolute Zugfestigkeit d. Stäbe	528
251. Zusammendrückung kurzer stabförmiger Körper	528
252. Absolut rückwirkende Festigkeit der Materialien	528
253. Elasticitätsgrenze	529
254. Abscheerung	529
255. Biegung eines Stabes	531
256. Relative oder Bruchfestigkeit	535
257. Anstrengung	537
258. Verschiedene Biegungsweisen	538
259. Zerknickungsfestigkeit	540
260. Torsionsfestigkeit	541
261. Festigkeit der Gefässe	543

Zweite Abtheilung.

Mechanik der flüssigen und luftförmigen Körper.

§. 262. Vorbemerkung . . . Seite 545.

I. Gesetze des Gleichgewichts flüssiger und luftförmiger Körper.

§.	Seite
263 — 266. Fortpflanzung des Druckes in flüssigen Körpern	545
267. Druck in den verschiedenen Punkten innerhalb einer Flüssigkeitsmasse. — Gleichheit dieses Druckes nach allen Richtungen hin	550
268—274. Drückungen in schweren Flüssigkeiten	551
275—276. Freie Oberfläche einer schweren Flüssigkeit	558
277—282. Druck auf die Wände	561
283. Grenzfläche zweier Flüssigkeiten	571
284—285. Communicirende Gefässe	573
286—289. — Flüssigkeiten, welche der Wirkung beliebiger Kräfte unterworfen sind	577
290—292. Kapillarerscheinungen	582
293. Fortpflanzung des Druckes in den Gasen	590
294. Die Gase sind schwer	591
295—297. Drückungen in schweren Gasen	593
298. Atmosphäre	596
299. Druck der atmosphärischen Luft	599
300—304. Das Barometer	601
305. Das Mariotte'sche Gesetz	613
306. Ausdehnung der Gase durch die Wärme; Gay-Lussac'sches Gesetz	615
307. Einfluss des Druckes der atmosphärischen Luft auf die Resultate für das Gleichgewicht der Flüssigkeiten	617
308—310. Communicirende Gefässe mit ungleichem Druck auf die freien Oberflächen	620
311. Mittel, ein constantes Niveau zu erhalten	624
312—313. Manometer	625

§. Seite

314. Zusammendrückbarkeit der tropfbaren Flüssigkeiten . . 627
315—316. Gleichgewicht der flüssigen und luftförmigen Körper, deren verschiedene Theile ungleiche Temperatur besitzen . 629
317. Luftwechsel in Bergwerken . 632
318. Zug in den Schornsteinen . 635
319—321. Das Archimedische Princip 638
322—323. Schwimmende Körper . 643
324. Anwendung des Archimedischen Princips zur Bestimmung des specifischen Gewichts fester und flüssiger Körper . 648
325—326. Aräometer 650
327—328. Schiffe und Kähne . . 654
329—330. Kanäle 656
331. Einfluss der atmosphärischen Luft auf das Gewicht eines Körpers 660
332—334 Der Luftballon . . . 661

II. Gesetze der Bewegung flüssiger und luftförmiger Körper.

§. Seite

335—339. Ausfluss einer Flüssigkeit durch eine kleine Oeffnung . 667
340—342. Einfluss der Ansatzröhrchen auf die Ausflussmenge 678
343—346. Ausfluss einer Flüssigkeit durch eine grössere Oeffnung in einer Seitenwand . . . 684
347. Der Saugheber 691
348. Constanter Ausfluss 694
349—350. Intermittirender Ausfluss 694
351. Heronsbrunnen 698
352—356. Bewegung der Flüssigkeiten in Röhren 699
357—358. Wirkungen der Kniee und Verengungen 711
359. Springbrunnen 713
360—362. Artesische Brunnen . . 715
363—364. Bewegung des Wassers in den Kanälen 722
365—366. Bewegung des Wassers in Flüssen 725
367—369. Messung der Geschwindigkeit des Wassers 728
370—371. Aichen eines fliessenden Wassers 732
372. Wassermesser 734
373—374. Ausfluss eines Gases durch eine Oeffnung . . . 735
375—376. Bewegung der Gase in Röhren 737
377. Messung der Geschwindigkeit eines Luftstroms 740
378. Die Gasuhr 740
379—382. Druck eines Flüssigkeitsstrahls gegen eine Fläche . 744
383—384. Druck, welchen ein Körper erleidet, der in eine in Bewegung begriffene Flüssigkeit eingetaucht ist 749
385. Druck eines bewegten Gases auf einen Körper 751
386. Widerstand der Luft beim Fall der Körper 752
387. Wirkung des Steuerruders bei der Bewegung eines Schiffes 754
388—392. Fortbewegung d. Schiffe mittelst Ruder, Räder oder Schrauben 756
393. Luftschifffahrt 764

III. Maschinen zum Heben der Flüssigkeiten.

§. Seite

394. Arbeit zum Heben von Flüssigkeiten 767
395. Paternosterwerk 769
396. Noria 771
397. Die Archimedische Wasserschraube 772
398. Die holländ. Wasserschraube 775
399. Das Wurfrad 776

§. Seite
400. Schöpfräder 778
401. Das Tympanum 780
402. Eimer 781
403. Göpel 783
404—411. Pumpen 784
412. Die Feuerspritze 797
413. Die Rotationspumpe 800
414. Bergwerkspumpen 801
415. Taucherkolben 803
416. Die Centrifugalpumpe . . . 805
417. Wasserzoll 807
418—419. Die hydraulische Presse 808

IV. Anwendung des Wassers als Motor.

§. Seite
420. Herstellung eines Wassergefälls 814
421. Totaleffekt einer Wasserkraft 815
422. Bedingungen, welche die hydraulischen Motoren zu erfüllen haben 816
423. Unterschlächtiges Wasserrad mit ebenen Schaufeln . . . 819
424. Oberschlächtiges od. Zellenrad 822
425. Mittel- od. Rückenschlächtiges Wasserrad 825
426. Ponceletrad 827
427. Räder, welche frei in einem weiten Kanal od. Fluss hängen 829
428. Löffelrad 830
429. Kufenrad 831
430. Reaktionsräder 832
431. Die Fourneyron'sche Turbine 834
432. Die Callon'sche Turbine . . 839
433. Die Fontaine'sche Turbine . 840
434. Henschel-Jonval-Köchlin'sche Turbine 842
435. Hydropneumatische Turbinen 844
436. Allgemeine Betrachtungen über die Anlage eines Wasserrads 847
437. Einfach wirkende Wassersäulenmaschine 848
438. Doppelt wirkende Wassersäulenmaschine 855
439. Der hydraulische Widder . . 859

V. Maschinen, welche zur Bewegung der Gase dienen.

§. Seite
440. Maschinen, welche zur Bewegung der Gase dienen . . . 863
441. Die Luftpumpe 864
442. Saugmaschinen 870
443. Compressionspumpen . . . 872
444. Blasbälge 872
445. Gebläse 875
446. Ventilatoren 876
447. Pneumatische Schraube . . 879
448. Wassertrommelgebläse . . . 880

VI. Anwendung des Windes als Motor.

§. Seite
449. Anwendung des Windes als Motor 882
450. Segelschiffe 882
451—453. Windmühlen 884

VII. Anwendung des Dampfes als Motor.

§. Seite
454. Anwendung des Dampfes als Motor 895
455—459. Eigenschaften d. Wasserdampfes 896
460. Die Newcomen'sche atmosphärische Maschine . . . 902
461—462. Einfach wirkende Watt'sche Dampfmaschine . . . 904

§.	Seite
463. Expansion des Dampfes	908
464—467. Cornwaller Dampfmasch.	910
468. Doppelt wirkende Watt'sche Dampfmaschine	922
469. Metallkolben	930
470. Bewegung des Schiebers	932
471. Verschiedene Expansionsarten	933
472. Die Woolf'sche Dampfmasch. mit zwei Cylindern	938
473. Veränderliche Expansion	939
474. Der Condensator	941
475. Hochdruckmaschinen	941
476. Uebertragung der Bewegung des Kolbens auf eine rotirende Welle	943
477—481. Dampfkessel	944
482. Der Dampfmaschinen-Indicator	955
483—484. Einiges über den Verbrauch u. die zweckmässige Benützung des Brennmaterials bei den Dampfmaschinen	959
485. Maschinen mit combinirten Dämpfen	963
486. Die calorische Maschine	964
487. Dampfschiffe	964
488—89. Lokomotiven	965
490. Lokomobilen	976
491. Giffard's Dampfstrahlpumpe	977

Einleitung.

§. 1. **Mechanik, Maschinen.** — Mit dem Worte Natur bezeichnen wir den Inbegriff alles dessen, was wir durch unsere Sinne wahrnehmen können. Jeden einzelnen Gegenstand in der Natur, wie z. B. ein Stück Stein, ein Pferd, ein Haus, nennen wir Naturkörper oder kurzweg Körper. Schon der erste Blick in die Natur zeigt uns die Körper entweder in Ruhe (ein Stein, welcher auf dem Boden liegt, ein stillstehendes Pferd) oder in Bewegung (ein herabfallender Stein, ein im Fahren begriffener Wagen). Die Untersuchung der Umstände, unter welchen erstere stattfindet, sowie die nähere Erforschung der Bewegungen und der Ursachen, durch welche sie hervorgebracht werden, bilden die Aufgabe der Mechanik, deren Grundzüge in vorliegendem Buche entwickelt werden sollen.

Maschine im weitesten Sinne des Wortes nennt man jede Vorrichtung, welche zum Zwecke hat, mittelst einer erst hervorgebrachten oder schon bestehenden Bewegung einen Widerstand, ein Hinderniss, zu überwinden. So z. B. hat eine Maschine, welche zum Emporheben von Lasten dient, wie ein Krahn, oder eine solche, welche Wasser in die Höhe zu fördern hat, wie eine Pumpe, die Aufgabe, mittelst einer nach aufwärts gerichteten Bewegung den Widerstand, welcher von dem Gewichte der zu hebenden Körper herrührt, zu überwinden. Eine zur Fortschaffung von Lasten dienende Maschine, wie die Locomotive, hat eine ganz oder nahezu horizontale Bewegung hervorzubringen, entgegen den Hindernissen, welche von der Reibung der Räder an ihren Achsen sowohl als an den Schienen, von dem Luftwiderstand und, bei ansteigender Bahn, von einem Theil des Gewichtes der Wägen und ihrer Ladung herrühren. Eine Maschine endlich, welche zur Bearbeitung der in der Technik gebrauchten Materialien, also vorzugsweise des Holzes, des Eisens etc. dient, wie eine Hobel- oder Bohrmaschine, eine Drehbank u. s. w. hat den

Zweck, von dem zu bearbeitenden Körper durch geeignete Bewegung eines zweckdienlich gestalteten Stückes, des Werkzeuges, entweder oder des Körpers selbst oder beider zugleich Theile loszureissen und also den Widerstand zu überwinden, welchen die Körper vermöge des Zusammenhalts ihrer Theile einer Trennung derselben entgegensetzen. Die Anwendung der Lehren der Mechanik auf das Studium der Maschinen ist bei dem grossen Einfluss, welchen die letzteren auf die gewerbliche und industrielle Thätigkeit der Menschen nicht blos, sondern auch auf das gesellschaftliche Zusammenleben derselben gewonnen haben, von der grössten Wichtigkeit; ihr soll desshalb auch ein Hauptaugenmerk in diesem Buche zugewendet werden.

Vorerst jedoch wird es gut sein, wenn auch nur mit wenigen Worten, das Wesentlichste von den allgemeinen Eigenschaften der Körper hervorzuheben. Eine richtige Einsicht in dieselben ist für das Verständniss der Lehren der Mechanik unerlässlich.

§. 2. **Ausdehnung.** — Jeder Körper nimmt einen bestimmten Raum ein; er besitzt eine gewisse Länge, Breite und Dicke (Höhe), oder er ist, wie man sagt, nach diesen drei Dimensionen ausgedehnt. Freilich ist in manchen Fällen die eine dieser Dimensionen von sehr geringer Grösse. So beträgt die Dicke der Collodiumhäutchen, aus denen kleine Luftballons gemacht werden, kaum den tausendsten Theil eines Millimeters; die Haut, von welcher die Seifenblasen umspannt sind, ist zuweilen nicht dicker als $^1/_{6000}$ Millimeter. In anderen Fällen sind beide, Breite und Dicke, sehr klein. Man hat Platindrähte gemacht, deren Dicke nicht grösser als $^1/_{3000}$ Linie war; von Baumwolle hat man Fäden bis zur Nummer 2150 gesponnen, so dass ein englisches Pfund solchen Garns eine Fadenlänge von $2150 \times 840 = 1806000$ engl. Ellen oder ungefähr 240 geographische Meilen enthält. Endlich gibt es noch Körper, deren Ausdehnung nach allen drei Dimensionen, deren Grösse im Ganzen also sehr klein ist. Von den Infusionsthierchen, aus deren Resten nach Ehrenberg ganze Lager von Tripel und Polirschiefer bestehen, kann man 40000 Millionen in einem Cubikzoll zählen; die Körnchen des feinsten Mehls, welches erzeugt wird, fallen durch ein Beuteltuch, bei welchem nahe an 20000 Oeffnungen auf den Quadratzoll kommen.

Man misst die Ausdehnung eines Körpers nach einer seiner drei Dimensionen hin durch die Einheit des Längenmaasses oder kurz die Längeneinheit. Diese ist in dem metrischen Maasssystem, das vorzüglich in Frankreich und Belgien zu Hause ist, der Meter oder der 40 millionste Theil des Umfangs der Erde, längs eines

Meridians gemessen. In andern Ländern, wie in den deutschen Staaten, in England, Russland etc. heisst die Längeneinheit Fuss, hat aber fast in jedem Lande eine andere Grösse.

1 Meter = 10 Decimeter = 100 Centimeter = 1000 Millimeter.
10 Meter = 1 Decameter; 100 Meter = 1 Hektometer; 1000 Meter = 1 Kilometer.
1 Fuss = 12 Zoll; 1 Zoll = 12 Linien, nach dem zwölftheiligen Maass, oder in Bayern auch 1 Fuss = 10 Zoll, 1 Zoll = 10 Linien Decimalmaass; 10 Fuss = 1 Ruthe (Bayern).

Ausdehnungen nach zwei Dimensionen, Flächen, werden durch die Einheit des Flächenmaasses, die Flächeneinheit, gemessen. Diese ist der Quadratmeter im metrischen System, oder der Quadratfuss, d. h. eine Fläche von einem Meter oder Fuss Länge und eben solcher Breite.

1 Quadratmeter = 100 Quadrat-Decimeter = 10000 Quadrat-Centimeter = 1000000 Quadrat-Millimeter.
1 Quadratfuss = 144 Quadratzoll; 1 Quadratzoll = 144 Quadratlinien nach dem zwölftheiligen Maass; in Bayern 1 Quadratfuss auch = 100 Quadratzoll; 1 Quadratzoll = 100 Quadratlinien nach dem Decimalmaass; 40000 Quadratfuss = 1 bayer. Tagwerk.

Die Grösse eines Körpers selbst endlich, sein Volumen, wird in Einheiten des Körpermaasses, in Cubikeinheiten, ausgedrückt. Als solche hat man den Cubikmeter oder den Cubikfuss, das sind Würfel von je einem Meter oder Fuss Länge, Breite und Höhe.

1 Cubikmeter = 1000 Cubik-Decimeter = 1000000 Cubik-Centimeter = 1000000000 Cubik-Millimeter.
1 Cubikfuss = 1728 Cubikzoll; 1 Cubikzoll = 1728 Cubiklinien bei zwölftheiligem Maass, oder 1 Cubikfuss = 1000 Cubikzoll; 1 Cubikzoll = 1000 Cubiklinien Decimalmaass.

Wir werden uns in diesem Buche vorzugsweise des metrischen Systems bedienen und zwar hauptsächlich mit aus dem Grunde, weil es, bei dem Mangel eines einheitlichen Systemes, jetzt auch häufig in Deutschland als Ersatz für ein solches angewendet und Hoffnung vorhanden ist, dass es nun bald als allgemeines deutsches Landesmaass eingeführt werden wird. Die Tabellen I, II und III am Schlusse dieses Werkes geben übrigens die Vergleichung der Längen-, Quadrat- und Cubikfusse der wichtigsten Länder unter sich und mit dem Meter, Quadrat- und Cubikmeter. Zugleich sind in diesen Tabellen noch einige andere, für besondere Fälle gebräuchliche Maasseinheiten angegeben.

§. 3. **Ausdehnbarkeit und Zusammendrückbarkeit.** — Das Volumen eines Körpers ist keineswegs unveränderlich. Durch äusseren Druck können alle Körper zusammengedrückt, durch Zug ausgedehnt werden. Das wirksamste Mittel aber, das Volumen der Körper zu ändern, ist der Wechsel der Temperatur. Durch

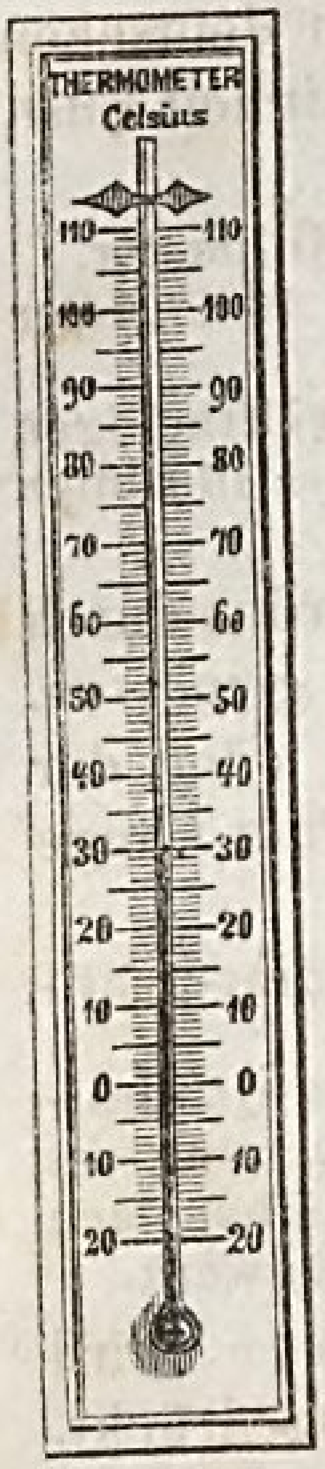


Fig. 1.

Erwärmen nehmen im Allgemeinen alle Körper ein grösseres Volumen an, sie dehnen sich aus, und beim Erkalten ziehen sie sich wieder zusammen. Ja, es wird umgekehrt die Volumenänderung mancher Körper benützt, um die Aenderungen ihrer Temperatur und damit zugleich die ihrer Umgebung zu messen. Die zu diesem Zwecke dienenden Instrumente, die Thermometer, bestehen aus Glasröhren, an welche unten Kugeln angeschmolzen sind (Fig. 1); sie werden mit Quecksilber (manchmal auch mit rothgefärbtem Weingeist) gefüllt; bei Erhöhung der Temperatur steigt diese Flüssigkeit in der Röhre, bei Erniedrigung jener fällt sie. An jedem solchen Thermometer werden zwei fixe Punkte bestimmt: derjenige, bis zu welchem es sinkt, wenn es in schmelzenden Schnee gesteckt wird (Eispunkt) und derjenige, bis zu welchem es steigt, wenn es in siedendes Wasser oder in den, aus demselben frei entweichenden Dampf gehalten wird (Siedepunkt). Die Eintheilung zwischen diesen beiden Punkten wird in verschiedener Weise gemacht. Das Celsius'sche oder Centesimal-Thermometer (C.) ist zwischen Eis- und Siedepunkt in 100 gleiche Theile getheilt und an dem Eispunkt mit Null, am Siedepunkt mit 100 bezeichnet. Es ist, besonders für wissenschaftliche Zwecke, das am weitesten verbreitete und wir werden in diesem Buche alle Temperaturen in seiner Scala angeben. In Deutschland ist neben ihm auch das Réaumur'sche Thermometer (R.) in Gebrauch, bei welchem die Entfernung zwischen Eis- und Siedepunkt in 80 gleiche Theile getheilt ist, und das am Eispunkt gleichfalls Null, am Siedepunkt aber 80 stehen hat. Die Engländer bedienen sich fast ausschliesslich des Thermometers nach Fahrenheit (F.). Bei demselben wird zwischen Eis- und Siedepunkt in 180 gleiche Theile getheilt; am Eispunkt steht 32, am Siedepunkt also 212. — Diese Theile heissen bei allen Thermometern Grade (⁰). Die Grade unter dem Nullpunkt heisst man wohl auch Kältegrade und setzt ihnen das Zeichen — (minus) vor; den Graden über Null, wenn sie von jenen unterschieden werden sollen, gibt man das Zeichen + (plus).

Nach den eben gemachten Angaben ist es leicht, eine Temperatur, die in irgend einer Scala gegeben ist, in die nach einer andern zu verwandeln. Folgende Tabelle kann dieses Geschäft erleichtern.

Tab. 1. Vergleichung der verschiedenen Thermometerscalen.

Celsius	Réaumur	Fahrenh.	Celsius	Réaumur	Fahrenh.	Celsius	Réaumur	Fahrenh.	Celsius	Réaumur	Fahrenh.
— 30°	— 24°	— 22°	20°	16°	68°	70°	56°	158°	120°	96°	248°
— 25	— 20	— 13	25	20	77	75	60	167	125	100	257
— 20	— 16	— 4	30	24	86	80	64	176	130	104	266
— 15	— 12	+ 5	35	28	95	85	68	185	135	108	275
— 10	— 8	14	40	32	104	90	72	194	140	112	284
— 5	— 4	23	45	36	113	95	76	203	145	116	293
0	0	32	50	40	122	100	80	212	150	120	302
+ 5	4	41	55	44	131	105	84	221	155	124	311
10	8	50	60	48	140	110	88	230	160	128	320
15	12	59	65	52	149	115	92	239	165	132	329

Durch Rechnung findet sich leicht ganz allgemein:

$$\pm n^0\,C. = \pm \frac{4}{5}\, n^0\,R. = (32 \pm \frac{9}{5}\, n)^0\,F.$$

$$\pm n^0\,R. = \pm \frac{5}{4}\, n^0\,C. = (32 \pm \frac{9}{4}\, n)^0\,F.$$

$$\pm n^0\,F. = \frac{5}{9}(\pm n - 32)^0\,C. = \frac{4}{9}(\pm n - 32)^0\,R.$$

Die Grösse der Ausdehnung ist für die nämliche Temperaturerhöhung bei verschiedenen Körpern sehr verschieden, und es ist in der Technik von grösster Wichtigkeit, sie zu kennen und ihr, wo es nöthig ist, Rechnung zu tragen. Für feste Körper, wie Steine, Eisen etc. kommt gewöhnlich nur die Ausdehnung nach einer Richtung hin, die lineare (oder Längen-) Ausdehnung in Betracht, und man gibt dieselbe gewöhnlich so an, dass man sagt, der Körper dehne sich bei einer Erwärmung um 1° oder 100° C. um den so und so vielsten Theil seiner Länge (oder Breite, oder Dicke) aus. Die so gebrauchten Zahlen nennt man lineare Ausdehnungs-Coëfficienten. Die Vergrösserung des ganzen Volumens des Körpers für dieselbe Temperaturerhöhung erhält man sehr nahezu, wenn man die linearen Ausdehnungs-Coëfficienten mit drei multiplicirt; die so erhaltenen Zahlen nennt man cubische Ausdehnungs-Coëfficienten. Bei flüssigen Körpern, wie Wasser, Oel etc., sowie bei gasförmigen, wie atmosphärische Luft, Leuchtgas etc. gebraucht man ausschliesslich die letzteren. Da die Ausdehnung der meisten Körper mit einer Annäherung, wie sie in

der Praxis fast immer gestattet ist, der Temperatur-Erhöhung proportional gesetzt werden kann, so erhält man die Ausdehnung irgend eines solchen Körpers für eine gewisse Aenderung der Temperatur, wenn man seinen Ausdehnungs-Coëfficienten für 1° mit der Anzahl der Grade, um welche er erwärmt wurde, multiplicirt.

Folgende Tabelle enthält die Ausdehnungs-Coëfficienten einiger der wichtigsten Stoffe.

Tab. 2. Ausdehnungs-Coëfficienten für 1° C.

Benennung der Stoffe	linear	cubisch	Benennung der Stoffe	linear	cubisch
Blei	$^1/_{34800}$	$^1/_{11600}$	Stahl, gehärtet .	$^1/_{72700}$	$^1/_{24200}$
Bronze	$^1/_{55000}$	$^1/_{18300}$	Stahl, ungehärtet	$^1/_{92600}$	$^1/_{30900}$
Schmiedeisen .	$^1/_{89600}$	$^1/_{29900}$	Zink, gegossen .	$^1/_{32800}$	$^1/_{10900}$
Gusseisen	$^1/_{90100}$	$^1/_{30000}$	Zinn, feines . .	$^1/_{43800}$	$^1/_{14600}$
Eisendraht . . .	$^1/_{87700}$	$^1/_{29200}$	Wasser	—	$^1/_{2276}$
Glasröhren . . .	$^1/_{108900}$	$^1/_{36300}$	Weingeist . . .	—	$^1/_{881}$
Gold	$^1/_{67100}$	$^1/_{22400}$	Quecksilber . .	—	$^1/_{5550}$
Kupfer, geschlagen	$^1/_{56100}$	$^1/_{18700}$	Oele, fette . . .	—	$^1/_{1200}$
Messing, gegossen	$^1/_{53500}$	$^1/_{17800}$	Gase, für alle nahezu derselbe	—	$^1/_{273}$
Silber	$^1/_{50300}$	$^1/_{16800}$			

Beispiele: Eine 20 Fuss lange Eisenstange dehnt sich bei einer Erwärmung von -20^0 (Wintertemperatur) bis $+30^0$ C. (im Sommer) um $20 \times \frac{1}{89600} \times 50 = \frac{1}{89,6}$ Fuss $= 1,6$ Linien aus. Um diese Ausdehnung nicht zu hindern und ein Krümmen und Werfen der Schienen zu vermeiden, wird beim Legen derselben zwischen je zweien ein entsprechender Spielraum gelassen. Wegen der grösseren Ausdehnung des Eisens im Vergleich mit der der Mauersteine muss beim Einmauern eines Dampfkessels zwischen ihm und dem Mauerwerk ein gewisser Spielraum ausgespart werden, wenn nicht gleich beim ersten Feuern das Mauerwerk zerrissen werden soll. In einem Fasse, das bei der Temperatur 0^0 C. vier Eimer (240 Maass) Oel enthält, würden sich beim Nachmessen bei einer Temperatur von 20^0 C. $240 \times \frac{1}{1200} \times 20 = 4$ Maass mehr finden. Ein solches Fass, bei niedriger Temperatur ganz voll gefüllt und gut verschlossen, würde bei höherer unfehlbar zersprengt werden.

Bezeichnet im Allgemeinen l_0 die Länge eines Körpers, v_0 sein Volumen bei 0^0 C. und α seinen linearen, β seinen cubischen Ausdehnungscoëfficienten, so ist bei einer Temperatur t^0 seine Länge l oder sein Volumen v:

$$l = l_0 (1 + \alpha t),$$
$$v = v_0 (1 + \beta t).$$

und bei einer andern Temperatur t':

$$l' = l_0 (1 + \alpha t'),$$
$$v' = v_0 (1 + \beta t').$$

Daher ist auch beim Uebergang irgend einer Temperatur t in eine andere t':

$$l = l' \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t'} = l' [1 + \alpha (t - t')],$$

$$v = v' \frac{1 + \beta t}{1 + \beta t'} = v' [1 + \beta (t - t')].$$

wobei jedoch die letzten Ausdrücke nur näherungsweise den ersten gleich sind.

Bei den Flüssigkeiten, die immer in ein Gefäss eingeschlossen sein müssen, hat man wohl zu beachten, dass sich bei ihrer Erwärmung auch das Gefäss mit ausdehnt, dass also die sich zeigende scheinbare Ausdehnung seines Inhalts eine kleinere ist, als die wirkliche. Da aber die Ausdehnung der meisten festen Körper bedeutend kleiner ist, als die der flüssigen, so ist der Unterschied nicht gross. Die oben angegebenen Ausdehnungs-Coëfficienten flüssiger und luftförmiger Körper sind die wirklichen; die scheinbaren sind um den cubischen Ausdehnungs-Coëfficienten des Stoffes, aus dem das Gefäss besteht, kleiner.

Eine scheinbare Ausnahme von der in diesem §. behandelten Regel machen manche feuchte oder nasse Körper, wie nicht vollständig trockenes Holz, plastischer Thon etc. Durch den Wasserverlust beim Erwärmen werden diese Körper kleiner, sie schwinden. Eine wirkliche Ausnahme aber macht das Wasser. Es zieht sich bei einer Erwärmung von 0 bis 4° C. zusammen, anstatt sich auszudehnen, und folgt erst über letzterer Temperatur der gewöhnlichen Regel, so dass es nicht bei 0°, sondern bei 4° seine grösste Dichtigkeit (vgl. unten §. 5) hat. Umgekehrt dehnt es sich bei einer Abkühlung unter 4° aus. Obwohl die ganze Zusammenziehung und Ausdehnung zwischen jenen zwei Temperaturen blos $^1/_{8400}$ beträgt, so ist sie doch, wie wir später zeigen werden, von den grössten Folgen in der Natur begleitet.

§. 4. **Theilbarkeit.** — Jeder Körper lässt sich durch Anwendung geeigneter Mittel (Zerschneiden, Zerstossen, Zerreiben, Mahlen) in Theile zerlegen, diese ihrerseits wieder in mehrere andere u. s. w. Bei manchen Körpern geht diese Theilbarkeit sehr weit. Man erinnere sich nur an die feinen Stäubchen des Mehls, an feinen Smirgel oder gar an das zum Poliren des Glases angewandte Polirroth, dessen Wirksamkeit, wie die aller Schleif- und Polirmittel überhaupt, darin besteht, dass jedes Körnchen Ritze in die Oberfläche des Glases einschneidet, welche die zuvor beim Schleifen mit Sand und Smirgel entstandenen gröberen Vertiefungen verdrängen, selbst aber so fein sind, dass sie weder durch das Gesicht, noch durch das Gefühl wahrgenommen werden können und daher die Oberfläche des Glases vollkommen glatt

erscheinen lassen. Obgleich man nun annehmen muss, dass die kleinen Theilchen, welche man durch die Anwendung der oben angegebenen mechanischen Mittel erhält, immer noch mehr zertheilt werden können, so darf man doch nicht voraussetzen, dass sich diese Theilung, selbst wenn wir die Mittel dazu besässen, bis in's Unendliche fortsetzen lasse. Man hat im Gegentheil gewichtige Gründe zu glauben, dass man dabei einmal auf Theilchen stossen würde, die sich nicht mehr weiter theilen lassen. Consequenterweise muss man sich dann auch vorstellen, dass bei jedem Theilen irgend eines Körpers niemals ein solches kleinstes Theilchen selbst getheilt wird, sondern dass dieselben vielmehr nur von einander losgetrennt werden, dass also der Körper schon ursprünglich aus ihnen zusammengesetzt ist.

Diese kleinsten Theilchen der Körper nennt man Atome. Die Dimensionen derselben müssen nach Obigem jedoch von ausserordentlich geringer Grösse vorausgesetzt werden. Man erhält ungefähr eine Vorstellung von ihnen, wenn man an die Infusionsthierchen denkt, von denen es nach Leuvenhoek solche gibt, die 1000 Millionen mal kleiner sind als ein Sandkorn. Und doch haben diese Thierchen noch Gliedmassen und andere Organe, die selbst wieder aus einer grossen Anzahl von Atomen bestehen.

Die Ausdrücke Moleküle und Theilchen werden angewendet, um sehr kleine Theilchen der Körper zu bezeichnen, die jedoch selbst noch eine grössere oder geringere Anzahl von Atomen enthalten können.

§. 5. **Porosität.** — Die Moleküle eines Körpers berühren sich nicht, sondern sind noch in grösserer oder kleinerer Entfernung von einander. Die in Folge dessen zwischen ihnen vorhandenen leeren Räume nennt man Poren. Solche Poren besitzen selbst die anscheinend dichtesten Körper. Dies zeigt am besten der Versuch, den die Akademiker in Florenz im Jahre 1661 anstellten. Sie füllten nämlich eine hohle Kugel von Gold mit Wasser, und als dasselbe stark hineingepresst wurde, sahen sie auf der Oberfläche der Kugel durchgesickertes Wasser in Gestalt von feinen Tropfen erscheinen; es hatte die Poren des Goldes durchdrungen. Aehnliches hat man in neuerer Zeit auch bei den hydraulischen Pressen bemerkt. Nun kann zwar nicht für alle Körper die Porosität auf eine solche unzweideutige Weise nachgewiesen werden; das Glas z. B. ist undurchdringlich für alle Flüssigkeiten. Aber die Ausdehnung der Körper durch Erwärmung und besonders ihre Zusammenziehung beim Erkalten lassen sich auf keine andere Weise erklären, als durch die Annahme, dass sich die Moleküle

einander nähern oder von einander entfernen, je nachdem die Temperatur erniedrigt oder erhöht wird. Daraus folgt aber nothwendig, dass in den in der Natur vorkommenden Körpern die Moleküle nicht schon in Berührung sein können.

Die Grösse und Anzahl der Poren zwischen den Molekülen eines Körpers ist natürlich bei verschiedenen Körpern verschieden und es bestimmt sich hiernach das, was man unter der Dichtigkeit eines Körpers versteht. Zwei verschiedene Körper von gleichem Volumen werden im Allgemeinen eine ungleiche Menge von Materie oder Stoff (Masse) enthalten, und da sich uns die Masse eines Körpers durch sein Gewicht zu erkennen gibt, so werden jene beiden Körper ein verschiedenes Gewicht zeigen. Das Verhältniss des Gewichts eines Körpers zu dem eines gleichgrossen Volumens reinen Wassers von der Temperatur 4° C. nennt man die Dichtigkeit, oder das specifische Gewicht dieses Körpers. Unter dem specifischen Gewicht eines Körpers hat man also die Zahl zu verstehen, welche angibt, wie vielmal irgend ein Stück desselben schwerer ist, als ein gleichgrosses Volumen reinen Wassers von der Temperatur 4° C. Folgende kleine Tabelle enthält die specifischen Gewichte von einigen der bekanntesten Körper.

Tab. 3. Specifische Gewichte bei 0° C.

Benennung der Körper.	sp. Gew.	Benennung der Körper.	sp. Gew.
Platina, gewalzt .	22,67	Braunkohle	1,20
Gold, geschmolzen	19,26	Ziegel, gebrannt .	1,81
Blei, geschmolzen	11,35	Sand, gemeiner . .	1,64
Silber, geschmolzen	10,47	Erde, lehmig, frisch	2,06
„ gehämmert.	10,62	Glas	2,5—2,8
Kupfer, gegossen .	8,79	Eichenholz, alt . .	1,17
„ gehämmert	9,00	Fichtenholz, trocken	0,45
Messing	8,20	Kork	0,24
Kanonenmetall . .	8,79	Eis	0,92
Zinn	7,29	Quecksilber	13,60
Zink, geschmolzen	7,04	Schwefelsäure, conc.	1,85
Gusseisen	7,21	Baumöl	0,92
Schmiedeisen . . .	7,79	Alkohol, absol. . .	0,79
Stahl, gehärtet . .	7,82	Luft, atmosph. . .	0,0013
Gussstahl	7,92	Sauerstoff (atmosph.	
Kalkstein, dichter	2,45	Luft = 1)	1,10
Gyps, gegoss., ausgtr.	0,97	Wasserstoffgas . .	0,069
Sandstein	2,35	Chlorgas	2,47
Granit	2,80	Stickstoff	0,97
Steinkohle	1,82	Kohlensäure	1,52

Ein Cubikdecimeter reines destillirtes Wasser bei 4° C. wiegt 1 Kilogramm; ein bayer. Cubikfuss desselben Wassers wiegt 44,4 Pfd. bayer. oder 49,7 Zollpfund; ein preussischer Cubikfuss 61,8 Pfd. preuss.; ein österreichischer 56,4 Pfd. österr.; ein englischer 62,4 Pfd. engl. Man erhält offenbar das Gewicht eines Körpers von bestimmter Grösse, wenn man diese letztere mit dem Gewichte der Volumeneinheit Wasser und mit dem specifischen Gewichte des Körpers multiplicirt. Ein 20 Fuss langer, 1 Decimalzoll breiter und ebenso dicker Eisenstab ist $\frac{1}{5}$ Cubikfuss gross und wiegt also $\frac{1}{5} \times 44{,}4 \times 7{,}79 = 69$ Pfd. bayer. Umgekehrt erhält man aus dem Gewichte eines Körpers sein Volumen, wenn man ersteres durch das Produkt aus dem Gewicht der Volumeinheit Wasser und dem specifischen Gewicht des Körpers, d. h. durch das Gewicht der Volumeinheit des Körpers dividirt. Ein 200 Kilogramm schwerer Marmorblock ist $\frac{200}{1 \times 2{,}45} = 81{,}6$ Cubik-Decimeter gross.

Bezeichnet allgemein v das Volumen, g das Gewicht und s das specifische Gewicht eines Körpers, so ist, mit w das Gewicht der Volumeinheit Wasser bezeichnet,

$$g = v.w.s \text{ und } v = \frac{g}{w.s}.$$

Dabei wurde die Temperatur ausser Acht gelassen, was in der Technik fast immer geschehen darf. Ihre Berücksichtigung ist übrigens nach dem, was in §. 3 gesagt wurde, sehr leicht, wenn man nur unter obigem v stets das Volumen des Körpers bei der, der Tabelle der specifischen Gewichte zu Grunde liegenden Temperatur, 0° C., versteht.

§. 6. **Aggregatzustände der Körper.** — Die Körper kommen in drei verschiedenen Zuständen vor: es gibt feste, flüssige und luftförmige Körper. Man nennt diese drei Zustände Aggregatzustände. Einer der in der Natur am weitesten verbreiteten Körper, das Wasser, zeigt sich gewöhnlich in flüssigem Zustande; es geht in den festen über, wenn es sich in Eis, und in den luftförmigen, wenn es sich in Dampf verwandelt. Ebenso wie das Wasser kann noch eine grosse Anzahl von andern Körpern in jedem dieser drei Zustände dargestellt werden, und die Analogie berechtigt uns zu dem Schlusse, dass dies bei allen Körpern möglich wäre, wenn man nur hinreichend kräftige Mittel anwenden würde oder könnte.

§. 7. **Feste Körper.** — In den festen Körpern haben die Moleküle eine bestimmte Lage gegeneinander, in der sie zu verharren streben; wenn man daher ihre gegenseitige Stellung, oder mit anderen Worten, die Gestalt des Körpers zu verändern sucht, so erfährt man einen gewissen Widerstand. Nichtsdestoweniger bringt jede auf einen Körper einwirkende Kraft wirklich eine Veränderung der gegenseitigen Lage der Moleküle oder eine Veränderung der Gestalt des Körpers hervor, die, je nach Um-

ständen, grösser oder geringer sein kann. Eine dünne Stange von Stahl, oder ein Streifen Glas werden schon unter der Anwendung einer geringen Kraft gebogen. Aber wenn dann die Kraft aufhört zu wirken, nehmen die Stahlstange und der Glasstreifen ihre Gestalt wieder an, die sie vorher hatten. Diese Eigenschaft der festen Körper, in ihre ursprüngliche Form wieder zurückzukehren, wenn sie der Einwirkung der Kraft entzogen werden, welche dieselbe abgeändert hatte, nennt man Elasticität. Wenn die auf einen Körper ausgeübte Kraft zu gross wird, so wird er entweder zerbrechen, oder es wird seine Gestalt so abgeändert werden, dass er seine ursprüngliche Form nicht mehr anzunehmen vermag, nachdem die Kraft wieder zu wirken aufgehört hat. In beiden Fällen sagt man dann, es sei die Elasticitäts-Grenze überschritten worden. Alle festen Körper sind elastisch, aber in sehr verschiedenem Grade. Manche sind es so wenig, dass es schwer ist, eine Kraft anzuwenden, die schwach genug wäre, um die Elasticitätsgrenze nicht überschreiten zu machen, und dass man sie in fast allen Fällen als vollständig unelastisch betrachten darf; dies ist z. B. der Fall bei Blei, Wachs etc. Andere dagegen sind sehr elastisch, wie Stahl, Kautschuk u. s. w.

§. 8. **Tropfbar flüssige Körper oder nicht zusammendrückbare Flüssigkeiten.** — Bei den flüssigen, sowie bei den luftförmigen Körpern oder Gasen sind die Moleküle ausserordentlich leicht gegeneinander verschiebbar. Die geringste Kraft reicht aus, um ihre gegenseitige Stellung zu verändern. Wegen dieser gemeinschaftlichen Eigenschaft begreift man jene beiden Arten von Körpern auch zuweilen unter dem gemeinschaftlichen Namen Flüssigkeiten (Fluida). Um dann die gewöhnlich flüssig genannten Körper daraus hervorzuheben, nennt man dieselbe tropfbare Flüssigkeiten, wegen ihrer Eigenschaft, in kleinen Mengen kugelfömige Gestalten oder Tropfen zu bilden.

Wenn man eine tropfbare Flüssigkeit in einem vollständig verschlossenen Gefäss zusammenzudrücken sucht, so erfährt man einen sehr grossen Widerstand und kann doch kaum eine Verminderung ihres Volumens erkennen. Diese Verminderung ist so gering, dass man lange gezweifelt hat, ob es überhaupt möglich ist, eine solche hervorzubringen; man hat desshalb auch die tropfbar flüssigen Körper mit dem Namen unzusammendrückbare Flüssigkeiten bezeichnet. Wir werden diese Vorstellung von der Unzusammendrückbarkeit der tropfbar flüssigen Körper beibehalten, obgleich es sich gezeigt hat, dass sie nicht ganz richtig ist. In der Praxis kann ein merkbarer Fehler daraus nicht entstehen.

§. 9. **Gase oder elastische Flüssigkeiten.** — Während man bei den tropfbar flüssigen Körpern auf sehr grosse Schwierigkeiten stösst, wenn man ihr Volumen nur um eine unbedeutende Grösse zu vermindern sucht, reicht schon eine geringe Kraft aus, um ein in einem geschlossenen Gefäss enthaltenes Gas in sehr merklichem Grade zusammenzudrücken. Eine mit Luft gefüllte Blase, deren Oeffnung luftdicht verschlossen ist, vermindert merklich ihr Volumen, wenn man sie zwischen beiden Händen zusammenpresst. Wenn man in eine Glasröhre (Fig. 2.), die an dem einen Ende geschlossen ist, einen Kolben einbringt, welcher an die Wände derselben luftdicht anschliesst, so dass die im Innern der Röhre enthaltene Luft nicht entweichen kann, und man sucht den Kolben vermittelst des an ihm befindlichen Stieles in die Röhre immer mehr hinein zu drücken, so wird man sehen, dass sich das Volumen der Luft in der That mehr und mehr vermindert, und dass man es auf diese Weise auf einen kleinen Bruchtheil seiner ursprünglichen Grösse reduciren kann. Wenn man alsdann den Kolben loslässt, so wird ihn die Luft wieder bis an's Ende der Röhre zurückschieben und ihr ursprüngliches Volumen vollständig wiederherstellen. Die Luft ist also in hohem Grade zusammendrückbar und elastisch. Dasselbe gilt für alle Gase, wesshalb dieselben auch den Namen *elastische Flüssigkeiten* erhalten haben.

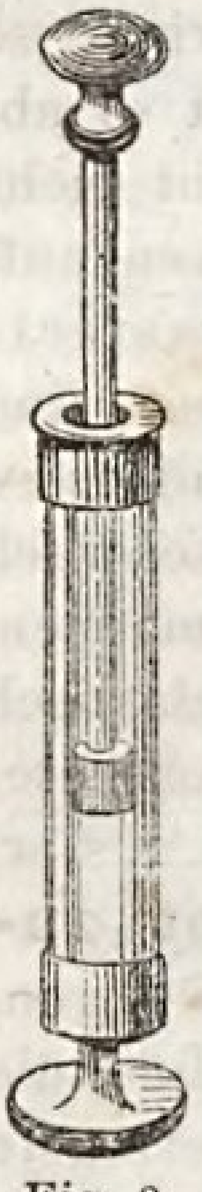


Fig. 2.

Wenn die Luft in dem eben beschriebenen Versuch schnell sehr stark zusammengedrückt wird, so erhöht sich ihre Temperatur bedeutend; und wenn man auf der unteren Fläche des Kolbens etwas Feuerschwamm befestigt, so kann derselbe so stark erhitzt werden, dass er sich entzündet. Man nennt desshalb auch den in Fig. 2 dargestellten Apparat *pneumatisches* oder *Luft-Feuerzeug*.

Ein Liter Wasser, durch Kochen in einem verschlossenen Gefäss in Dampf verwandelt, gibt 1697 Liter Dampf. Denkt man sich nun, dass beim Uebergang aus dem flüssigen in den luftförmigen Zustand die Moleküle des Wassers einfach ihre Entfernung vergrössern, so ist dieselbe Menge von Molekülen, die beim Dampf in 1697 Liter enthalten ist, beim Wasser in *einem* Liter zusammengedrängt. Man sieht daraus, dass in dem dampfförmigen Zustand die Moleküle eine im Vergleich zu den Entfernungen, durch welche sie getrennt sind, sehr geringe Grösse haben müssen. Das Gleiche gilt für alle luftförmigen Körper.

Erste Abtheilung.

Die Grundlehren der Mechanik im Allgemeinen und der Mechanik fester Körper im Besonderen.

I. Vorbegriffe.

Erste Begriffe von der Bewegung.

§. 10. **Ruhe und Bewegung.** — Wenn ein Körper nach und nach verschiedene Orte des Raumes einnimmt, so sagt man, er sei in Bewegung. Eine Kugel, welche auf dem Boden fortrollt, ein Pferd, welches auf einer Strasse geht, ein Schiff, das einen Fluss hinabfährt, sind Körper in Bewegung.

Wir können die Ortsveränderungen der Kugel, des Pferdes, des Schiffes nur dadurch erkennen, dass wir diese mit benachbarten Gegenständen vergleichen, welche uns als Anhaltspunkte dienen. Solche Anhaltspunkte sind z. B. die Unebenheiten des Bodens, die Krümmungen der Strasse oder des Flusses, die Bäume, welche zur Seite der letzteren stehen etc. Unser eigener Körper dient uns oft als Anhaltspunkt, um die Bewegung der Körper in unserer Nachbarschaft zu erkennen.

Wenn wir nirgends ein Merkmal haben, um die Bewegung eines Körpers zu beurtheilen, so halten wir ihn für unbewegt. Dies ist z. B. der Fall, wenn wir uns in der Kajüte eines Dampfschiffes befinden, das auf einem Fluss fährt, und die herabgelassenen Vorhänge an den Fenstern benehmen uns die Aussicht auf die aussen befindlichen Gegenstände. Alles, was uns umgibt, erscheint uns dann als unbewegt, und diese Vorstellung der Ruhe setzt sich so fest in uns, dass der erste Eindruck, den wir, auf's Verdeck zurückgekehrt, erfahren, der ist, dass wir glauben, die Ufer des Flusses, die Bäume, die Häuser seien in Bewegung; und nur dadurch, dass wir uns selbst dazu zwingen, können wir zu der Vorstellung zurückkehren, dass sich die Bäume und Häuser in Ruhe befinden und das Schiff mit Allem, was es trägt, in Bewegung ist.

Wenn die Anhaltspunkte, mit deren Hilfe wir die Ortsveränderungen eines Körpers beurtheilen, selbst in Bewegung sind, so heisst die so beobachtete Bewegung, die also auf jene, als unbeweglich gedachte, Anhaltspunkte bezogen wird, eine relative. Ein Beispiel für eine solche erhält man, wenn eine Kugel auf dem Verdeck eines in Bewegung befindlichen Schiffs dahin rollt, vorausgesetzt, dass man die Ortsveränderungen der Kugel nach den als feststehend angenommenen Gegenständen in ihrer nächsten Umgebung, auf dem Schiffe, beurtheilt. Eine ganz andere Bewegung würde man erhalten, wenn man die am Ufer des Flusses befindlichen festen Punkte, Bäume etwa, als Vergleichungspunkte benützen würde. Dabei könnte es selbst stattfinden, dass die Kugel als ruhend erschiene. Dies wäre offenbar der Fall, wenn sie vom Vorder- nach dem Hintertheile des Schiffs mit solcher Geschwindigkeit geworfen würde, dass sie trotz der Bewegung des Schiffes stets demselben Punkte des Ufers gegenüberbliebe. Das Schiff würde dann einfach unter ihr weggleiten, ohne sie mit fortzunehmen.

Absolut, im Gegensatz zu relativ, kann man eine Bewegung nur dann nennen, wenn man sie auf absolut ruhende, d. h. ihren Ort im Raum nicht verändernde Punkte oder Gegenstände bezieht. Es hat keine Schwierigkeit, sich solche Anhaltspunkte vorzustellen. Ob es aber in Wirklichkeit Körper gibt, die sich in absoluter Ruhe befinden, ist sehr zweifelhaft. Auf der Erde wenigstens bewegen sich alle, für gewöhnlich als ruhend betrachtete Dinge, Häuser, Bäume, Berge etc. mit der Erde täglich um ihre Achse sowohl, als jährlich um die Sonne. Und die Sonne selbst wieder kreist, wenn auch in scheinbar nur sehr langsamer Bewegung, mit all den sog. Fixsternen, die wir am Himmel erblicken, um einen gemeinschaftlichen Centralpunkt. Alle Bewegungen daher, die wir rings um uns auf der Erdoberfläche beobachten, die Bewegung des Wassers und des Windes, die Ortsveränderungen geworfener Körper, laufender Thiere u. s. w. sind relative Bewegungen. Bei der Betrachtung dieser Bewegungen, selbst wenn man sie nur relativ nimmt, darf man, streng genommen, die Erde nicht als ruhend betrachten. Ihre Bewegung, an welcher alle auf ihr befindlichen Körper Theil nehmen, ist von Einfluss auf alle Bewegungen dieser Körper. Aber dieser Einfluss ist ein so geringer, dass er in den allermeisten Fällen gar nicht bemerkbar wird. Wir werden daher in der Folge alle Bewegungen, von denen wir sprechen werden, in der Regel als absolute betrachten, d. h. die Erde als ruhend voraussetzen. In

der Anwendung der Mechanik auf Maschinen insbesondere ist dies immer erlaubt.

§. 11. **Weg, Arten der Bewegungen.** — Wenn man sich im Geiste die Aufeinanderfolge der Orte, welche ein sich fortbewegender Punkt nach und nach einnimmt, vergegenwärtigt, so erhält man eine gerade oder krumme Linie, welche man die Bahn des Punktes oder den von ihm zurückgelegten Weg nennt. In der Mechanik sieht man sich häufig veranlasst, die Bewegung solcher Punkte zu betrachten, legt ihnen aber eine gewisse, wenn auch stets nur sehr kleine Grösse und eine bestimmte Masse bei. Man nennt sie dann materielle Punkte. Die Wichtigkeit der an ihnen angestellten Untersuchungen leuchtet sofort ein, wenn man bedenkt, dass nach §. 4 jeder Körper aus solchen materiellen Punkten oder Molekülen zusammengesetzt gedacht werden kann.

Die Aufeinanderfolge der Orte, welche ein Körper einnimmt, sein Weg also, ist wieder ein Körper im geometrischen Sinne, d. h. ein nach den drei Dimensionen ausgedehnter Raum, der nicht mit Materie ausgefüllt zu sein braucht. Es hat jedoch meistens nur sehr geringes Interesse, diese Bahn des Körpers im Ganzen zu betrachten. Man lernt seine Bewegung viel besser kennen, wenn man die der einzelnen materiellen Punkte, aus denen er bestehend gedacht werden kann, näher verfolgt. In dieser Beziehung findet man dann, dass vom einfacheren zum zusammengesetzten fortschreitend, folgende vier Bewegungsarten der Körper unterschieden werden können:

1) Wenn sämmtliche Punkte eines Körpers genau gleichgestaltete, parallele, also nur durch ihre Lage im Raume unterschiedene, übrigens gerade oder krumme Wege beschreiben, so nennt man die Bewegung des Körpers eine fortschreitende. Sie hat, wie man unschwer einsieht, schon statt, wenn nur die Bahnen dreier Punkte des Körpers, die ein Dreieck bilden, obige Bedingungen erfüllen, oder wenn sich jede Seite dieses Dreiecks bei der Bewegung des Körpers stets parallel bleibt. Letztere Eigenschaft gibt das sicherste Erkennungszeichen, um eine fortschreitende Bewegung von jeder anderen zu unterscheiden.

Es ist klar, dass bei der in Rede stehenden Bewegungsart der Weg des ganzen Körpers bekannt ist, wenn man die Bahn nur eines seiner Punkte kennt. Umgekehrt darf man sich offenbar den ganzen Körper durch irgend einen seiner Punkte ersetzen, und sich in demselben die ganze Masse des Körpers concentrirt denken. Der Weg dieses Punktes ist es dann, den man meint, wenn man von dem Weg des ganzen Körpers spricht, und es ergibt

sich hieraus leicht, was man sich unter einer gerad- oder krummlinig fortschreitenden Bewegung eines Körpers zu denken hat.

Geradlinig fortschreitende Bewegungen kommen in der praktischen Mechanik häufig vor. Der Kolben und Kreuzkopf einer Dampfmaschine, der Tisch oder auch das Werkzeug bei einer Hobelmaschine machen eine solche. Viel seltener sind krummlinig fortschreitende Bewegungen.

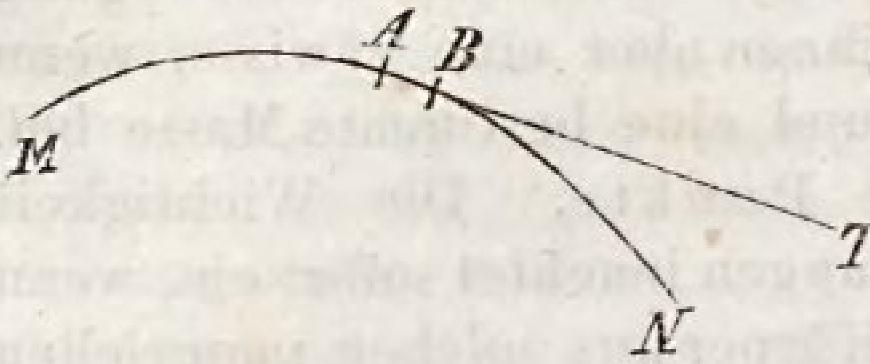


Fig. 3.

Bei geradliniger Bahn ist die Richtung der Bewegung des Körpers oder materiellen Punktes zugleich die der geraden Linie, welche er beschreibt, also durchweg die nämliche. Bei einer Bewegung in krummer Linie MN (Fig. 3) aber ist die Richtung, welche der Körper verfolgt, jeden Augenblick eine andere, und zwar für irgend einen Ort A des Körpers in seiner Bahn die der Tangente AT, welche man erhält, wenn man das auf A folgende sehr kleine Stückchen AB der Bahn als gerad betrachtet und nach der Seite hin, nach welcher sich der Körper bewegt, verlängert.

2) Bei der Bewegung eines Körpers um eine feste Achse, d. h. um eine gerade, durch ihn hindurch gehende oder überhaupt in fester Verbindung mit ihm stehende Linie bleiben alle Punkte der letzteren unverrückt an ihrer Stelle, während alle anderen Punkte des Körpers Kreise beschreiben, deren Ebenen senkrecht auf jener Drehungsachse stehen, und deren Mittelpunkte in dieser liegen. Die Radien dieser Kreise sind die Entfernungen der betreffenden Punkte von der festen Achse. Hiebei kann natürlich von einer Bahn des ganzen Körpers in der obigen Bedeutung keine Rede mehr sein, um so weniger, als in gewissen Fällen, wie z. B. bei einer Kugel, die sich um eine, durch ihren Mittelpunkt gehende Achse dreht, der Körper den Raum, den er einnimmt, gar nicht verlässt.

Wir werden in der Folge diese Art von Bewegung Drehungs- oder Rotationsbewegung schlechtweg nennen. Sie ist in der praktischen Mechanik die am häufigsten vorkommende und desshalb von grosser Wichtigkeit. Alle Riemenrollen, Zahnräder, Schwungräder, Transmissionsrollen, Kurbeln etc. etc. rotiren um eine feste Drehungsachse.

3) Wenn bei der Bewegung eines Körpers nur ein einziger in ihm befindlicher oder fest mit ihm verbundener Punkt unver-

ändert seine Lage beibehält, so bewegen sich alle seine anderen Punkte auf Kugeloberflächen, deren Radien ihre Abstände von jenem festen Punkte sind. Man sagt dann, der Körper drehe um einen festen Punkt. Es ist nun leicht einzusehen, dass diese Drehung eigentlich gar nicht anders vor sich gehen kann, als dass sich der Körper in jedem Moment um eine bestimmte, durch jenen Punkt gehende Achse dreht, dass aber freilich die Lage dieser Achse von Augenblick zu Augenblick eine andere werden kann. Damit ist eigentlich im Principe diese Bewegung auf die vorige zurückgeführt, wobei nur noch vorauszusetzen bleibt, dass in jedem Augenblick die Richtung der Drehungsachse bestimmt werden kann, eine Aufgabe, die oft sehr schwierig ist.

Die Drehbewegungen um feste Punkte kommen in den Anwendungen nur selten vor. Wo sie angewendet werden, da ist der feste Punkt meistens entweder von einer Spitze, in welche der Körper ausläuft, und die sich gegen eine feste Unterlage stützt, oder von dem Mittelpunkt einer Kugel gebildet, die von einer anderen, hohlen Kugel theilweise umschlossen wird (Nuss). Letzteres ist z. B. bei der Bewegung der Tischplatten der besseren Messtische der Fall.

4) Wenn kein einziger Punkt des bewegten Körpers seinen Ort beibehält, und die Bahnen der verschiedenen Punkte auch die in Nr. 1 aufgestellten Bedingungen nicht erfüllen, so erhält man die allgemeinste Bewegung eines Körpers. Denkt man sich dabei irgend einen Punkt des Körpers hervorgehoben, so kann man sich offenbar vorstellen, dass sich der ganze Körper mit diesem Punkte in fortschreitender Bewegung befindet (Nr. 1) und sich zugleich um ihn dreht (Nr. 3), also um eine, freilich in jedem Augenblick veränderliche Achse, welche aber stets durch jenen Punkt geht, rotirt. Man denkt sich dann wohl auch die ganze Masse des Körpers in diesem Punkte vereinigt, und der Weg des letzteren ist es dann wieder, den man zu verstehen hat, wenn man von der Bahn des ganzen Körpers spricht. Welchen Punkt man hervorzuheben hat, ist vorläufig gleichgültig; gewöhnlich nimmt man, schon im praktischen Leben, den Mittelpunkt des Körpers, wenn er einen solchen hat. So sagt man z. B. von einer abgeschossenen Kanonenkugel, sie beschreibe eine krumme Linie, und denkt dabei nur an ihr Centrum. Wenn man sagt, die Erde bewege sich in einer, nahezu kreisförmigen Bahn um die Sonne, so abstrahirt man gleichfalls von ihrer Ausdehnung und denkt sich ihre ganze Masse in ihrem Mittelpunkt vereinigt.

Die Bewegung allgemeinster Art kommt sehr häufig vor; die meisten krummlinigen Bewegungen von Körpern sind solche. So die Bewegung eines Wagens um eine Strassenecke, eines Eisenbahnzuges in einer Curve der Bahn. Wenn man namentlich die oben zuletzt hervorgehobene Eigenschaft der fortschreitenden Bewegung gehörig beachtet, so wird man die Bewegungen in den soeben angeführten Beispielen nicht mit ihr verwechseln, wie es nicht selten geschieht. Bei der fortrollenden Bewegung einer Billard- oder Kegelkugel ist eine solche Verwechselung weniger leicht möglich. Sie gibt zugleich ein Beispiel einer geradlinigen Bewegung allgemeinster Art. Die Bewegung der Erde um die Sonne und um ihre Achse zugleich gibt noch ein Beispiel für eine krummlinige Bewegung allgemeinster Art, bei welcher obige Verwechselung nicht leicht gemacht werden wird.

Da sich die letzten beiden der in diesem §. betrachteten Bewegungsarten wenigstens im Princip auf die fortschreitende und Rotationsbewegung zurückführen lassen, so können solche Eigenschaften der letzteren, die sich blos auf die Bewegung im Allgemeinen beziehen, auf erstere übertragen werden. Es darf daher nicht Wunder nehmen, wenn wir in den nächsten Paragraphen nur von den beiden ersten Arten der Bewegung reden.

§. 12. **Zeit.** — Ein Körper kann sich nicht an zwei Orten zugleich befinden; er bedarf Zeit, um von einem zum andern zu gelangen, um eine bestimmte Wegstrecke zurück zu legen. Die Einheit für das Zeitmaass entnehmen alle civilisirten Völker den sich von selbst darbietenden astronomischen Erscheinungen und zwar der regelmässigsten von allen, der Umdrehung der Erde um ihre Achse. Die Zeit, welche von einem Mittag zum andern, d. h. von einem Meridiandurchgang der Sonne zum andern verstreicht, nennt man Tag. Der Tag wird in 24 Stunden, die Stunde in 60 Minuten, die Minute in 60 Secunden getheilt. Die Stunde hat also 3600 und der Tag 86400 Secunden. Diese Eintheilung des Tages besorgen die Uhren durch die bekannte Bewegung ihrer Zeiger.

Der oben definirte Tag heisst Sonnentag und die darnach gemessene Zeit Sonnenzeit. Der Sonnentag ist wegen der Bewegung der Erde um die Sonne etwas länger als ein Sterntag, der Zeit zwischen zwei Meridiandurchgängen eines anderen Fixsterns, aber nicht zu allen Jahreszeiten gleich lang. Seine mittlere Länge, genannt mittlerer Sonnentag oder Tag mittlerer Zeit, ist es, die oben gemeint und eingetheilt ist. Der Sterntag hat nur 23 Stunden 56 Minuten 4 Secunden mittlerer Zeit.

§. 13. **Gleichförmige Bewegung, Geschwindigkeit.** — Wenn ein Körper in auf einander folgenden gleichen Zeitabschnitten

gleiche Wege durchläuft, wie gross oder wie klein auch jene Zeitabschnitte genommen werden, Minuten, Secunden, Viertelsecunden u. s. w., so heisst seine Bewegung **gleichförmig**. Dabei ist es natürlich gleichgültig, ob die Bahn selbst gerad- oder krummlinig ist.

Je grösser der Weg ist, der in irgend einer gegebenen Zeit bei einer solchen Bewegung durchlaufen wird, desto grösser, sagt man, sei ihre **Geschwindigkeit**, oder desto schneller gehe sie von statten. In der Mechanik aber legt man dem Worte Geschwindigkeit eine präcisere Bedeutung bei, als es gewöhnlich geschieht. Man versteht darunter nämlich den Weg, der in jeder Zeiteinheit durchlaufen wird. Wenn ein Eisenbahnzug z. B. in jeder Secunde 10 Meter durchläuft, so sagt man, seine Geschwindigkeit beträgt 10 Meter in der Secunde. Man sieht daraus sofort, dass man bei derselben Bewegung verschiedene Zahlen für die Geschwindigkeit erhält, je nachdem man die Einheiten der Zeit und des Längenmaasses wählt. Derselbe Eisenbahnzug von vorhin durchläuft in der Stunde 36000 Meter oder 36 Kilometer. Seine Geschwindigkeit kann also auch zu 36 Kilometer in der Stunde angegeben werden. Es ist daher nothwendig, so, wie wir es oben immer gethan haben, zu der Zahl, welche die Geschwindigkeit ausdrückt, die Einheiten der Zeit und des Längenmaasses hinzuzufügen, welche man zu Grunde gelegt hat.

Einheit der Geschwindigkeit nennt man diejenige Geschwindigkeit, bei welcher in der Einheit der Zeit die Längeneinheit an Weg zurückgelegt wird. Folgende Tabelle gibt eine Vergleichung einiger Geschwindigkeitseinheiten.

Tab. 4. Geschwindigkeitseinheiten.

Meter per Secunde	Fuss bayer. per Sec.	Fuss preuss. per Sec.	Fuss österr. per Sec.	Fuss engl. per Sec.	Knoten per $\frac{1}{2}$ Min. = Seemeilen per Stunde.	Meilen engl. per Stunde.	Meilen deutsche per Stunde.
1	3,426	3,186	3,163	3,281	1,944	2,237	0,486
0,292	1	0,930	0,923	0,958	0,567	0,653	0,142
0,314	1,075	1	0,993	1,030	0,610	0,702	0,153
0,316	1,083	1,007	1	1,037	0,615	0,707	0,154
0,305	1,044	0,971	0,964	1	0,593	0,682	0,148
0,514	1,762	1,639	1,627	1,688	1	1,151	0,250
0,447	1,531	1,424	1,414	1,467	0,869	1	0,217
1,788	7,048	6,556	6,508	6,752	4,000	4,604	1

Zum Verständniss dieser und ähnlicher Tabellen reicht wohl die Bemerkung aus, dass immer die in horizontaler Reihe nebeneinander stehenden Zahlen, versehen mit der in vertikaler Columne darüber stehenden Benennung, gleichwerthig sind. Mit Hilfe der Tab. I am Schlusse kann obige leicht noch erweitert werden.

Wenn bei einer gleichförmigen Bewegung die Geschwindigkeit 3 Meter in der Secunde beträgt, so ist offenbar der in 15 Secunden zurückgelegte Weg $3 \times 15 = 45$ Meter. Wurde bei einer andern gleichförmigen Bewegung mit einer Geschwindigkeit von 5 Meter in der Secunde ein Weg von 30 Meter gemacht, so dauerte diese Bewegung $\frac{30}{5} = 6$ Secunden lang. Und wenn endlich in 8 Secunden 40 Meter durchlaufen werden, so ist die Geschwindigkeit $\frac{40}{8} = 5$ Meter in der Secunde. Demnach ist es leicht, von den drei Grössen: Geschwindigkeit, Zeit und Weg bei einer gleichförmigen Bewegung eine zu finden, wenn die beiden andern bekannt sind.

Bezeichnet allgemein c die Geschwindigkeit einer gleichförmigen Bewegung und s den in der Zeit t zurückgelegten Weg, so ist offenbar:

$$s = ct\ ;\ t = \frac{s}{c}\ ;\ c = \frac{s}{t}.$$

Manchmal gibt man zur Bezeichnung der Geschwindigkeit wohl auch die Zeit an, die zur Zurücklegung der Längeneinheit gebraucht wird. So sagt man besonders bei Eisenbahnfahrten, es wurde die Meile oder Wegstunde in so und so viel Minuten durchlaufen. Es ist leicht, diese Art von Geschwindigkeitsangabe auf die obige zu übertragen. So ist offenbar die Geschwindigkeit einer Locomotive, welche die Meile (24000 Fuss) in 10 Minuten durchläuft gleich $\frac{24000}{600} = 40$ Fuss in der Secunde.

§. 14. **Gleichförmig periodische Bewegung, mittlere Geschwindigkeit.** — Es ist in der, am Anfang des vorigen §. gegebenen Erklärung der gleichförmigen Bewegung von Wichtigkeit, dass man besonders auf die Bedingung achtet, dass die in auf einander folgenden gleichen Zeitabschnitten durchlaufenen Wege gleich sein sollen, welches auch die Grösse jener Zeitintervalle ist. Denn wenn man z. B. bei irgend einer Bewegung finden würde, dass zwar die in den auf einander folgenden ganzen Secunden durchlaufenen Wege gleich wären, dass aber in jeder ersten halben Secunde ein grösserer Weg beschrieben würde, als in der zweiten, so wäre diese Bewegung keine gleichförmige. So durchläuft der Secundenzeiger einer Uhr in den auf einander folgenden Secunden gleiche Theile seines Zifferblattes; aber nachdem er

irgend einen dieser Theile mit grosser Schnelligkeit durchlaufen hat, bleibt er eine gewisse Zeit lang auf dem Strich am Ende dieses Theiles stehen, um darauf den folgenden Theil mit eben solcher Schnelligkeit zu durchlaufen und am Ende desselben wieder eine kleine Zeit stehen zu bleiben u. s. f. Ebenso gebraucht der Kolben einer Dampfmaschine bei gleichförmigem Gang derselben zu jedem Hin- sowohl als Hergang (Hub) die nämliche Zeit. Aber während er an jedem Ende seines Hubs einen Augenblick stehen bleibt, um umzukehren, wächst seine Geschwindigkeit von da bis zur Mitte des Cylinders, um von hier aus bis zum andern Ende ebenso wieder abzunehmen.

Man nennt solche Bewegungen, wo zwar in gewissen, auf einander folgenden gleichen Zeitintervallen gleiche, aber in den Unterabtheilungen dieser Intervalle verschiedene Wege durchlaufen werden, gleichförmig periodische Bewegungen. Sie können, so lange man nicht auf kleinere Zeitabschnitte eingeht, als jene Intervalle sind, gewissermassen als gleichförmige Bewegungen betrachtet werden. Unter ihrer mittleren Geschwindigkeit versteht man die Zahl, welche man erhält, wenn man das gleiche Wegintervall, welches in den auf einander folgenden gleichen Zeitabschnitten durchlaufen wird, durch die Grösse eines solchen Zeitabschnitts dividirt, oder wenn man die Gesammtlänge der in einer gewissen Zeit durchlaufenen Wegintervalle durch jene Zeit theilt. So beträgt die mittlere Geschwindigkeit des Kolbens einer Dampfmaschine, welche 40 Doppelhübe (40 Umdrehungen der Schwungradwelle) von je $2\frac{1}{2}$ Fuss Länge in der Minute macht, offenbar $\frac{80 \times 2\frac{1}{2}}{60} = 3\frac{1}{3}$ Fuss in der Secunde.

§. 15. **Ungleichförmige Bewegung, mittlere Geschwindigkeit.** — Wenn die Wege, welche in aufeinanderfolgenden gleichen Zeitintervallen durchlaufen werden, ungleich sind, so nennt man die Bewegung eine ungleichförmige oder veränderte. So ist die Bewegung eines fallenden Körpers eine veränderte; ebenso die Bewegung eines Eisenbahnzuges, wenn er sich einer Anhaltsstelle nähert oder von einer solchen abfährt.

In einer veränderten Bewegung wechselt die Geschwindigkeit von einem Augenblick zum andern. Wenn man sich nun denkt, dass von einem bestimmten Moment an die Bewegung fortgesetzt würde, ohne ihre Schnelligkeit zu ändern, so würde von da ab die Bewegung gleichförmig sein; die Geschwindigkeit dieser gleichförmigen Bewegung heisst dann die Geschwindigkeit der verän-

derten Bewegung in jenem bestimmten Moment. Wenn man z. B. sagt, dass die Geschwindigkeit eines Eisenbahnzuges, der, indem er sich einer Anhaltsstelle nähert, allmählich immer langsamer und langsamer fährt, in einem bestimmten Augenblick 4 Meter in der Secunde betrage, so bedeutet das nicht etwa, dass der Zug in einer Secunde einen Weg von 4 Meter wirklich durchläuft, sondern dass er diesen Weg in der Secunde durchlaufen würde, wenn die Schnelligkeit seiner Bewegung von dem betrachteten Augenblick an gleichbliebe.

Man nennt eine veränderte Bewegung beschleunigt, so lange ihre Geschwindigkeit zunimmt, verzögert dagegen, so lange sich ihre Geschwindigkeit vermindert.

Wenn die Geschwindigkeit in auf einander folgenden gleichen Zeitabschnitten, wie gross oder wie klein dieselben auch genommen werden mögen, um gleichviel zu- oder abnimmt, so nennt man die Bewegung gleichförmig beschleunigt oder verzögert und versteht unter der Beschleunigung derselben die Geschwindigkeits-Zu- oder Abnahme in der Zeiteinheit, gewöhnlich in der Secunde. Besitzt daher ein Körper in einem bestimmten Augenblick eine Geschwindigkeit von 40 Meter und bewegt er sich von da ab mit einer Beschleunigung von 5 Meter in der Secunde, so wird er nach 6 Secunden eine Geschwindigkeit von $40 + 5 \times 6 = 70$ Meter erreichen, wenn seine Bewegung gleichförmig beschleunigt ist, oder seine Geschwindigkeit wird auf $40 - 5 \times 6 = 10$ Meter herabsinken, wenn er sich gleichförmig verzögert bewegt. — Ein Beispiel einer gleichförmig beschleunigten Bewegung ist, wie wir später sehen werden, der freie Fall der Körper; seine Beschleunigung beträgt 9,8088 Meter in der Secunde.

Nennt man überhaupt c die Anfangsgeschwindigkeit eines Körpers, b seine Beschleunigung und v die Geschwindigkeit, die er nach t Secunden erreicht, so ist für die gleichförmig beschleunigte Bewegung:

$$v = c + bt\ ;\ b = \frac{v - c}{t}\ ;\ t = \frac{v - c}{b};$$

und für die gleichförmig verzögerte:

$$v = c - bt\ ;\ b = \frac{c - v}{t}\ ;\ t = \frac{c - v}{b}.$$

Um den Weg, den ein ungleichförmig bewegter Körper in einer bestimmten Zeit zurücklegt, zu erhalten, misst man denselben entweder direct, vorausgesetzt, dass dies möglich ist, oder man denkt sich die ganze Dauer seiner Bewegung in sehr viele gleiche, sehr kleine Zeitabschnitte getheilt, so klein, dass man ohne merklichen Fehler annehmen darf, dass sich innerhalb derselben die

Geschwindigkeit des Körpers nicht verändere. Den Weg, der in einem solchen kleinen Zeitintervall zurückgelegt wird, erhält man dann, indem man die Geschwindigkeit am Anfang des Zeittheilchens mit diesem selbst multiplicirt, und den gesammten Weg des Körpers, indem man die so erhaltenen kleinen Produkte sämmtlich addirt. Die Addition so vieler, eigentlich unendlich vieler unendlich kleiner Grössen ist freilich meist nur der höheren Mathematik möglich. Wir werden uns daher später, bei näherer Betrachtung derjenigen ungleichförmigen Bewegung, welche von grösster Wichtigkeit ist, nämlich des freien Falls des Körpers, des ersteren Weges bedienen, indem wir irgend einen Körper verschieden lange Zeiten hindurch frei herabfallen lassen.

Wenn man den Weg, den ein ungleichförmig bewegter Körper in irgend einer gegebenen Zeit zurückgelegt hat, mit dieser Zeit dividirt, so erhält man die sog. mittlere Geschwindigkeit des Körpers. Es ist dies nichts anderes, als die Geschwindigkeit, welche er besitzen müsste, um in der gegebenen Zeit den nämlichen Weg mit gleichförmiger Bewegung zurückzulegen.

Folgende Tabelle enthält die mittlere Geschwindigkeit für einige der am häufigst vorkommenden Bewegungen.

Tab. 5. Mittlere Geschwindigkeiten.

Benennung des bewegten Körpers.	Geschwindigkeit in Metern per Sec.
Ein guter Fussgänger	1,6
Ein Pferd im Schritt	0,9 — 1,1
„ „ im Trab	2,0 — 2,2
„ „ im Galopp	4,0 — 5,0
Ein Frachtwagen	0,8
Ein Postwagen	3,0
Ein gewöhnlicher Eisenbahnzug	7,0 — 8,0
Ein Schnellzug	14,0
Ein Dampfschiff	3,0 — 7,0
Einpfünder Kanonenkugel	480
Vierundzwanzigpfünder Kanonenkugel	780
Schall in der Luft (bei 16 ° C.)	340
Gewöhnl. Geschw. der Seine, innerhalb Paris	0,47
Geschwindigk. d. Seine bei Neuilly (5,2 Meter über Sommerwasser)	0,78

Benennung des bewegten Körpers.	Geschwindigkeit in Metern per Sec.
Mittlere Geschw. des Rheins zwischen Worms und Mainz (bei 1,15 Meter Mainzer Pegel) .	1,0
Mittlere Geschwindigkeit der Rhone . . .	2,0
bei Hochwasser bis	4,0
Schwacher, eben noch fühlbarer Wind . . .	1,0
Schwacher Wind	2,0
Frische Brise, die Segel gut gespannt . . .	6,0
Günstigster Wind für die Windmühlen, auch für die Fortbewegung der Schiffe auf der See am vortheilhaftesten	7,0
Sehr lebhafter Wind (die grossen Segel werden eingezogen)	12,0
Sehr starker Wind	15,0
Heftiger Wind	20,0
Grosser Sturm	27,0
Orkan	36,0
Starker Orkan, Gebäude zerstörend . . .	45,0

§. 16. **Rotationsbewegung, Winkelgeschwindigkeit.** — Wenn man sich von irgend einem Punkte eines rotirenden Körpers (§. 11 Nr. 2) eine Senkrechte auf die Drehungsachse gefällt denkt, so wird diese Senkrechte während der Bewegung nach und nach immer grössere Winkel mit ihrer ursprünglichen Lage bilden; diese Winkel sind offenbar für alle die Senkrechten, die von den verschiedenen Punkten des Körpers auf die Drehungsachse gezogen werden können, in demselben Augenblick einander gleich, und man spricht daher von ihnen als von dem Winkel, um welchen sich der Körper seit dem Beginn der Bewegung gedreht hat. Wenn die so von dem Körper beschriebenen Winkel in auf einander folgenden gleichen Zeitintervallen einander gleich sind, welches auch jene Zeitintervalle seien, so sagt man, die Rotationsbewegung sei eine gleichförmige. In diesem Falle durchlaufen alle Punkte des Körpers die Peripherien von Kreisen mit gleichförmiger Bewegung (§. 13), und ihre Geschwindigkeit in diesen Kreisen ist offenbar um so grösser, je weiter sie von der Drehungsachse entfernt sind, und um so kleiner, je näher sie derselben liegen, und zwar ist sie ihrem Abstande von der Drehungsachse proportional. Wenn man daher

die Geschwindigkeit eines dieser Punkte kennt, der in bestimmter Entfernung von der Drehungsachse gelegen ist, so kann man daraus die aller übrigen Punkte des Körpers leicht finden. Gewöhnlich gibt man die Geschwindigkeit desjenigen Punktes an, der um die Längeneinheit von der Rotationsachse entfernt ist, und nennt diese die Winkelgeschwindigkeit des ganzen Körpers. Es ist klar, dass man dann die Geschwindigkeit irgend eines Punktes des Körpers erhält, wenn man die Winkelgeschwindigkeit mit der Entfernung dieses Punktes von der Drehungsachse multiplicirt. Bei einem Wasserrade z. B. von 16 Fuss Durch- oder 8 Fuss Halbmesser, dessen Winkelgeschwindigkeit $1\frac{1}{4}$ Fuss in der Secunde beträgt, ist die Geschwingkeit der äussersten Punkte am Umfang $1\frac{1}{4} \times 8 = 10$ Fuss in der Secunde. Hieraus geht zugleich hervor, dass die Winkelgeschwindigkeit von der Wahl der Längeneinheit gänzlich unabhängig ist. Eine Winkelgeschwindigkeit von 2 Fuss in der Secunde ist ganz die nämliche wie die von 2 Meter in derselben Zeit, da erstere in der Entfernung von 1 Fuss, letztere in dem Abstand von 1 Meter von der Drehungsachse zu nehmen ist.

Manchmal versteht man unter der Winkelgeschwindigkeit des rotirenden Körpers auch den Winkel, um welchen sich derselbe in der Einheit der Zeit dreht. So sagt man, die Erde habe bei ihrer Umdrehung um ihre Achse, d. h. um die Linie, welche durch ihre Pole geht, eine Winkelgeschwindigkeit von 15 Grad in der Stunde und meint damit, dass eine Linie, welche im Innern der Erde senkrecht auf ihre Achse gezogen ist, in jeder Stunde einen Winkel von 15 Grad beschreibt.

Bei raschen Rotationsbewegungen endlich, wie sie besonders bei Maschinen vorkommen, drückt man die Winkelgeschwindigkeit auch häufig durch die Zahl der Umdrehungen aus, die in der Zeiteinheit gemacht werden. So spricht man z. B. von einer Geschwindigkeit von 300 Umdrehungen in der Minute, oder 5 Umdrehungen in der Secunde.

Wenn man sich erinnert, dass man den Umfang eines Kreises erhält, indem man seinen Durchmesser mit $3\frac{1}{7}$ (genauer 3,14159) multiplicirt, dass also ein Punkt in der Entfernung der Längeneinheit von der Drehungsachse bei einer ganzen Umdrehung $6\frac{2}{7}$ Längeneinheiten zurücklegt, von welchen der 360. Theil auf einen Grad kommt, so ist es leicht, obige drei Arten der Messung der Winkelgeschwindigkeit in einander überzuführen. Bei einer Winkelgeschwindigkeit von $1\frac{1}{4}$ Fuss in der Secunde z. B. (1. Art) werden in der Secunde $\frac{1\frac{1}{4}}{6\frac{2}{7}} = 0{,}2$ und folglich in der

Minute 12 Umdrehungen gemacht (3. Art); die in der Secunde zurückgelegte Anzahl Grade ist $0,2 \times 360 = 72$ (2. Art). — Wenn sich die Erde in der Stunde um 15 Grad dreht, so macht sie 1 Umdrehung in 24 Stunden und ihre Winkelgeschwindigkeit ist $6,2832 \times \frac{15}{360} = 0,2618$ Fuss oder Meter in der Stunde oder 0,0043 Fuss oder Meter in der Minute. — Bei einer Geschwindigkeit von 5 Umdrehungen in der Secunde endlich werden in dieser Zeit $5 \times 360 = 1800$ Grade beschrieben und die Winkelgeschwindigkeit beträgt, $5 \times 6^2/_7 = 31\ /_7$ Fuss oder Meter in der Secunde.

Folgende Tabelle erleichtert diese Ueberführung verschieden ausgedrückter Winkelgeschwindigkeiten in einander.

Tab. 6. Verschiedene Einheiten für die Winkel-Geschwindigkeit.

Fuss oder Meter in der Secunde.	Grade per Secunde.	Anzahl der Umdrehungen per Min.
1	57,296	9,549
0,01745	1	$^1/_6$
0,10472	6	1

Bezeichnet allgemein n die Anzahl der Umdrehungen in der Minute bei einer Rotationsbewegung, deren Winkelgeschwindigkeit a Fuss oder Meter oder w Grade in der Secunde, so ist, unter π die Ludolf'sche Zahl 3,14159 verstanden,

$$a = \frac{2 n \pi}{60} = 0,10472\, n \ ; \ w = 6 n^0$$

$$n = \frac{60\, a}{2 \pi} = 9,549\, a \ ; \ w = \frac{360\, a}{2 \pi} = 57,296\, a$$

$$a = \frac{2 \pi w}{360} = 0,01745\, w \ ; \ n = \frac{1}{6}\, w.$$

Wenn bei einer Rotationsbewegung zwar die Winkel, welche in gewissen auf einander folgenden, gleichen Zeitintervallen beschrieben werden, einander gleich sind, nicht aber die in den Unterabtheilungen jener Intervalle beschriebenen, so heisst die Bewegung eine periodische Rotationsbewegung; sie kann, ähnlich wie oben (§. 14), so lange man nicht auf kleinere Zeitabschnitte eingeht, gewissermassen als gleichförmige Rotationsbewegung betrachtet werden.

Wenn ein Körper, der sich um eine Achse dreht, in auf einander folgenden gleichen Zeitintervallen ungleiche Winkel beschreibt, so heisst die Rotationsbewegung eine ungleichförmige oder veränderte. Man kann alsdann natürlich nicht mehr von Winkelgeschwindigkeit überhaupt, sondern nur von der reden, die in irgend einem gegebenen Augenblick stattfindet, und versteht darunter die Winkelgeschwindigkeit derjenigen gleichförmigen Rotationsbewegung, welche der Körper annehmen würde, wenn sich von dem gegebenen Augenblick an seine Bewegung weder beschleunigen noch verzögern würde. Die mittlere Geschwindigkeit einer solchen ungleichförmigen Rotationsbewegung während einer gewissen Zeit erhält man, wenn man die Zahl der Umdrehungen in dieser Zeit, oder die Zahl der Grade, um welche sich der Körper gedreht hat, oder den Weg, den ein in der Entfernung der Längeneinheit von der Drehungsachse befindlicher Punkt zurückgelegt hat, durch die Zeit dividirt.

§. 17. **Zusammensetzung mehrerer gleichzeitiger Bewegungen.** — Es lässt sich unschwer einsehen, dass ein Körper mehrere Bewegungen zu gleicher Zeit haben kann. Jeder Körper, der sich auf einem in Bewegung begriffenen Schiffe von seinem Platze entfernt, bewegt sich zugleich mit dem Schiffe vorwärts. Stünde das Schiff still, so wäre es allein die erstere Bewegung, die der Körper besässe; bliebe er in dem bewegten Schiffe ruhig stehen, so würde er einfach die Bewegung des Schiffes theilen. In Wirklichkeit ist seine Bewegung aus jenen beiden zusammengesetzt. Viele Maschinen geben sehr lehrreiche Beispiele von zusammengesetzten Bewegungen. Bei den meisten Hobelmaschinen ist das Werkzeug, der Meisel, in einen Support eingespannt, der von links nach rechts bewegt werden kann. Dieser Support selbst wieder lässt sich in einem Schlitten auf und ab bewegen. Durch gleichzeitige Hervorbringung beider Bewegungen kann man offenbar die Meiselspitze jede beliebige krumme Linie in einer Vertikalebene beschreiben lassen. Ja, wenn das Gestell, in welchem sich der letztgenannte Schlitten bewegt, selbst wieder längs der Bahn der Hobelmaschine beweglich wäre, so liesse sich offenbar durch gleichzeitiges Hervorbringen aller drei Bewegungen mit der Meiselspitze jede krumme Linie im Raume beschreiben. Diese letzten Beispiele sind desshalb merkwürdig, weil sie zeigen, wie aus zwei oder drei wechselseitig auf einander senkrechten *geradlinigen* Bewegungen jede krumme Linie in der Ebene oder im Raum erzeugt, oder wie jede krummlinige Bewegung eines Punktes aus zwei oder drei geradlinigen zusammengesetzt

werden kann. — Aber auch solche Bewegungen, die aus gerad- und krummlinigen oder blos krummlinigen einfachen Bewegungen zusammengesetzt sind, kommen bei den Maschinen vor. Bei dem zum Ausbohren von Dampfcylindern dienenden Bohrmaschinen ist der Meisel in ein Stück eingespannt, das mit einer starken Drehungswelle, die sog. Bohrspindel, so verbunden ist, dass es sich mit derselben herumdrehen und zugleich längs derselben verschoben werden kann. Wenn nun die Bohrspindel gedreht und jenes Stück gleichzeitig längs derselben verschoben wird, so beschreibt die Meiselspitze eine krumme Linie, die man Schraubenlinie nennt, und deren Gestalt wesentlich von dem Verhältniss der Geschwindigkeiten jener beiden einfachen Bewegungen abhängt.

Um die Bewegung, welche aus zwei oder mehreren einfachen Bewegungen zusammengesetzt ist, aus diesen letzteren abzuleiten, gehen wir zuerst von dem einfachsten Fall aus, wo ein Körper zwei geradlinige und gleichförmige Bewegungen besitzt, und halten uns der besseren Verständlichkeit wegen an das oben zuerst angeführte Beispiel eines Schiffes, auf dem sich ein Körper bewegt, eine Kugel z. B., die auf dem Verdecke fortrollt. Das Schiff (Fig. 4) bewege sich gleichförmig und in gerader Linie einen Fluss hinab; auf dem Verdeck dieses Schiffes liege in dem Punkte A eine Kugel, die an der Bewegung des Schiffes Theil nimmt und sich folglich, wenn sie ihren Platz auf dem Verdeck nicht ändert, gleichförmig und in der geraden Linie AB bewegt, und zwar mit einer Geschwindigkeit, welche sie in der nächsten Secunde von A nach D bringen würde. Die Kugel erhalte aber zu gleicher Zeit nach der Richtung AC eine bestimmte Geschwindigkeit, so dass sie sich, wenn das Schiff stillstehen würde, in dieser Richtung geradlinig und gleichförmig fortbewegen und innerhalb einer Secunde von A nach E kommen würde. Nach Verfluss einer Secunde wird das Schiff um die Grösse AD vorgerückt sein; dadurch wird die Linie AC, auf welcher die Kugel fortrollt, und

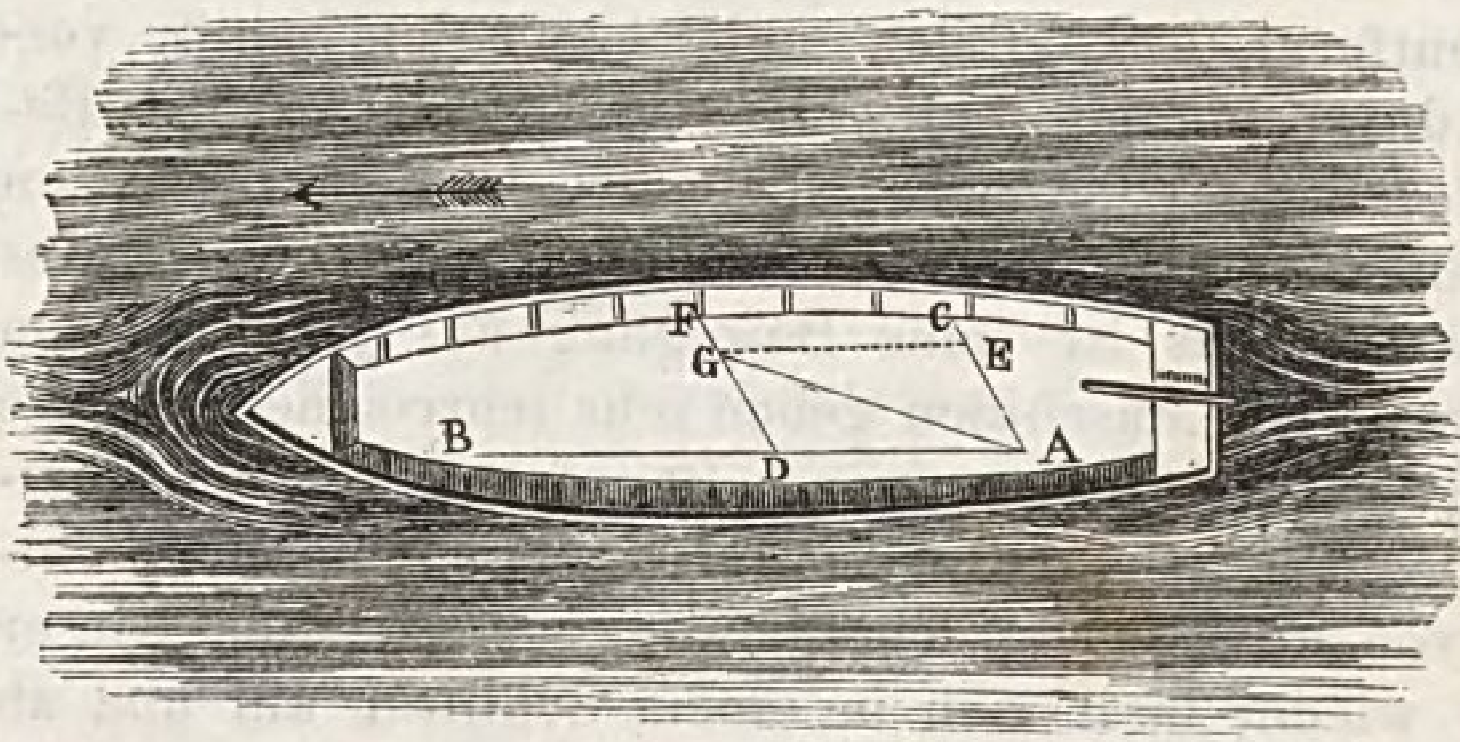


Fig. 4.

welche man sich auf dem Verdeck aufgezeichnet denken kann, parallel zu sich selbst in die Lage DF versetzt. Aber in derselben Zeit hat sich die Kugel in dieser Linie um die Länge AE fortbewegt, und weil der Punkt E nach G versetzt wird, wobei er die Linie EG parallel zu AD beschreibt, so befindet sich die Kugel zu Ende der betrachteten Secunde in G. Am Anfang dieser Secunde war die Kugel in A und zu Ende derselben befindet sie sich in G. Wenn man auf dieselbe Weise, wie wir es soeben gethan haben, suchen würde, wo die Kugel nach einer halben, oder nach einer Viertelsecunde wäre, so würde man finden, dass sie sich auf der Linie AG, und zwar in der Mitte oder in dem vierten Theil derselben, von A aus gerechnet, befinden würde. Sie bewegt sich also geradlinig und gleichförmig in der Richtung der Linie AG mit solcher Geschwindigkeit, dass sie in der ersten Secunde den Weg AG, die Diagonale des über den Wegen AD und AE construirten Parallelogramms beschreibt.

Die Wege AD und AE der einfachen und der AG der zusammengesetzten Bewegung in einer Secunde sind aber bekanntlich die Geschwindigkeiten dieser gleichförmigen Bewegungen. Die Kugel also, welche zu gleicher Zeit eine Geschwindigkeit AD und eine andere AE besitzt, zeigt in Wirklichkeit nur eine einzige Geschwindigkeit, welche der Grösse und Richtung nach durch die Diagonale des Parallelogramms dargestellt wird, welches man über den Geschwindigkeiten AD und AE construirt. Man nennt obigen Satz auch wohl den Satz von der Zusammensetzung der Geschwindigkeiten, die Geschwindigkeiten AD und AE Seitengeschwindigkeiten, die AG aber mittlere oder Resultanten-Geschwindigkeit.

Wir haben bisher vorausgesetzt, dass die beiden Bewegungen, von welchen der Körper zu gleicher Zeit ergriffen ist, gleichförmig und stets nach der nämlichen Geraden gerichtet seien. Wenn dies nicht mehr der Fall ist, so wissen wir aus der Erklärung des §. 15, dass man sich unter den Geschwindigkeiten AD und AE, welche der Körper in dem Moment besitzt, wo er sich in A befindet, die Wege vorzustellen hat, welche der Körper in einer Secunde beschreiben würde, wenn er sich von da an, einmal der einen, einmal der andern Bewegung frei überlassen, gleichförmig und immer in der nämlichen Richtung fortbewegen würde. Die Diagonale AG stellt dann der Grösse und Richtung nach den Weg vor, welche der Körper zufolge der beiden Bewegungen in dieser Secunde wirklich beschreiben würde; ihre Grösse

bezeichnet also die Geschwindigkeit, welche der Körper zufolge seiner beiden Bewegungen in dem Moment besitzt, wo er sich in A befindet, und ihre Richtung bezeichnet die Richtung des Wegs, welche der Körper in dem Augenblick, wo er von A abgeht, wirklich einschlägt. Da man nun annehmen kann, dass sich während eines nächsten sehr kleinen Zeittheilchens der Körper wirklich ein kleines Stückchen weit auf der Diagonale AG fortbewegt, und da man am Ende dieses Zeittheilchens oder am Anfange des nächsten die oben gelehrte Construction wiederholen kann, so leuchtet jetzt schon ein, wie man mittelst des obigen Satzes von der Zusammensetzung der Geschwindigkeiten aus den beiden hinreichend bekannten einfachen Bewegungen die zusammengesetzte herleiten kann. Spätere Anwendungen werden dies noch klarer erkennen lassen, als es jetzt schon möglich ist.

Wenn ein materieller Punkt oder ein Körper, dessen Masse man sich in einem solchen concentrirt denken darf, mehr als zwei Bewegungen zu gleicher Zeit besitzt, so lässt sich die, aus diesen zusammengesetzte Bewegung durch wiederholte Anwendung der obigen Construction leicht finden. Man wird nämlich zuerst zwei der Seitengeschwindigkeiten in eine Resultantengeschwindigkeit vereinigen, diese alsdann mit der dritten u. s. f., so viele ihrer vorhanden sind. Es ist dabei nicht einmal nothwendig, dass alle Bewegungen in der nämlichen Ebene vor sich gehen. Durch die Richtung irgend zweier derselben in einem bestimmten Augenblick lässt sich immer eine Ebene gelegt denken und in dieser das Parallelogramm construiren. Durch die Diagonale desselben und die Richtung der dritten Bewegung legt man dann gleichfalls eine Ebene u. s. w.

Wenn die Bewegung eines Körpers, der in irgend einem Augenblick die Geschwindigkeit AG (Fig. 4) besitzt, auch nicht durch Zusammensetzung zweier einfacher Bewegungen hervorgegangen ist, so kann man sich doch immerhin denken, dass diese seine Geschwindigkeit aus den beiden Seitengeschwindigkeiten AD und AE, den Seiten des Parallelogramms, dessen Diagonale sie ist, entstanden sei. Wenn man dann wirklich die ursprüngliche Geschwindigkeit durch jene Seitengeschwindigkeiten ersetzt, so sagt man, man habe sie in diese zerlegt. Verfährt man so durch die ganze Bewegung hindurch, also gerade umgekehrt wie oben, so erhält man statt der ursprünglichen Bewegung zwei Bewegungen, die, zusammengesetzt, jene wieder geben; man hat die ursprüngliche Bewegung zerlegt.

Die Aufgabe, die sich dabei immer wiederholt, ist blos die, aus der gegebenen Diagonale AG eines Parallelogramms dieses selbst und damit die Seiten AD und AE zu construiren. Bei der Lösung dieser Aufgabe bleiben aber manche Willkürlichkeiten möglich. So kann man die Richtungen AB und AC der Seiten des Parallelogrammes beliebig annehmen und findet dann ihre Länge, indem man GD parallel zu AC und GE parallel zu AB zieht. Oder man kann die Längen AD und AE oder AD und DG der Seiten als gegeben voraussetzen, und dann aus den drei gegebenen Seiten das Dreieck ADG construiren. Durch Ergänzung desselben findet sich leicht das Parallelogramm und damit die Richtungen AB und AC der Seiten. Wollte man endlich noch die Grösse und Richtung einer der Seiten, AD z. B., willkürlich annehmen, so würde man dadurch unmittelbar das eine Dreieck ADG, durch Ergänzen desselben das Parallelogramm und damit Grösse und Richtung der anderen Seite AE erhalten.

Da man auf gleichem Wege jede Seitengeschwindigkeit, in welche man eine ursprüngliche schon zerlegt hat, in zwei neue zerlegen kann, so leuchtet daraus hervor, wie sich jede beliebige Bewegung in beliebig viele andere zerlegen lässt. Dabei lässt die Unbestimmtheit der Aufgabe zu, dass man den Seitengeschwindigkeiten durch die ganze Bewegung hindurch einerlei Richtung beilegt. Die aus jener Bewegung erhaltenen Seitenbewegungen sind dann von der Art, dass sie stets nach derselben Richtung hin erfolgen, d. h. sie sind geradlinig. Wir sind hiedurch also zu demselben Resultat gelangt, wie oben bei dem Beispiel mit der Hobelmaschine, zu der Einsicht nämlich, dass man jede krummlinige Bewegung aus zwei oder drei geradlinigen zusammensetzen kann. Die analytische Mechanik gebraucht diese Zerlegung als wesentliches Hilfsmittel bei ihren Rechnungen. Wir werden in der Folge wenig Gelegenheit haben, sie anzuwenden.

Wenn man das Verfahren, durch welches wir oben zwei Bewegungen in eine einzige zusammensetzten, aufmerksam betrachtet, so zeigt es sich als auf der Voraussetzung beruhend, dass die eine von zwei gleichzeitigen Bewegungen, die ein Körper besitzt, die andere nicht stört. Diese Voraussetzung, die sich eigentlich nicht von vornherein strenge erweisen lässt, hat sich durch die Erfahrung durchweg bestätigt. Man nennt sie desshalb ein Princip der Mechanik. Es wurde dasselbe schon von Copernikus (1472 — 1543) ausgesprochen und von ihm zur Widerlegung der Einwendungen gegen die Achsendrehung der Erde gebraucht.

§. 18. **Relative oder scheinbare und absolute Bewegung.** — Das Beispiel, welches im vorigen §. den Betrachtungen zu Grunde gelegt wurde, lässt sich auch noch in anderer Beziehung ausbeuten. Nach den Erklärungen des §. 10 ist AE (Fig. 4) die relative Bewegung der Kugel in Bezug auf das Schiff, AG ihre absolute und AD die absolute Bewegung des Schiffs (die Gegenstände am Ufer als absolut ruhend vorausgesetzt). Einem Beobachter, der sich auf dem Schiffe selbst befindet, wird es vorkommen, als wenn die Kugel die Bewegung AC wirklich ausführte; man nennt dieselbe desshalb wohl auch die für ihn scheinbare Bewegung der Kugel. So sind alle Bewegungen, die wir auf der Erde und überhaupt in Beziehung zur Erde, welche wir uns immer unwillkürlich als ruhend denken, beobachten, solche scheinbare Bewegungen. In allen solchen Fällen, wo sich der beobachtete Körper und vielleicht sogar auch der Beobachter auf den als feste Anhaltspunkte genommenen, aber selbst in Bewegung begriffenen Gegenständen befinden und von diesen in ihrer Bewegung mit fortgenommen werden, ist es meist die relative Bewegung des beobachteten Körpers und die absolute der Anhaltspunkte, welche direct beobachtet werden. Aus ihnen findet sich dann, dem vorigen Paragraph zufolge, die absolute Bewegung des betrachteten Körpers, wenn man über ihren Geschwindigkeiten das Parallelogramm construirt und dessen Diagonale als Geschwindigkeit der gesuchten absoluten Bewegung nimmt.

Es gibt aber auch Fälle, wo die (wirkliche) Bewegung des beobachteten Körpers und die desjenigen, auf welchen man seine (scheinbare) Bewegung bezieht, gänzlich unabhängig von einander sind. Da sind es dann meist die absoluten Bewegungen beider Körper, die man unmittelbar beobachtet, während die relative Bewegung des ersten in Bezug auf den zweiten erst gefunden werden muss. Ein Beispiel wird dies anschaulicher machen. Bei der Untersuchung der Einwirkung, welche das Wasser eines Mühlbaches gegen die Schaufeln des Wasserrades ausübt, welches er herumtreibt, kommt es vorzugsweise auf die relative Bewegung der Wassertheilchen in Bezug auf die Schaufeln des Rades an. Nun sind es hier offenbar die absoluten Bewegungen des Wassers und der Radschaufeln, welche gegeben sind, und die relative Bewegung jenes gegen diese soll gefunden werden.

Zu diesem Behufe gebraucht man folgenden Kunstgriff: Wenn man sich beiden Körpern gemeinschaftlich eine Bewegung ertheilt denkt, so wird dadurch offenbar ihre relative Bewegung in nichts geändert. Nehmen wir für den Augenblick an, das auf die

Schaufeln treffende Wasser fliesse aus der Oeffnung eines grossen Gefässes hervor, und dieses Gefäss sammt dem Rade stehe auf einem grossen Schiffe, so ist es für die relative Bewegung des Wassers und der Schaufeln offenbar gleichgiltig, ob das Schiff in Bewegung ist oder nicht, wenigstens dann, wenn diese seine Bewegung geradlinig ist, wie es schon oben stillschweigend vorausgesetzt wurde und zu den nachfolgenden Betrachtungen auch völlig ausreichend ist. Nun kann man sich die gemeinschaftliche Bewegung, welche man beiden Körpern ertheilt, so denken, dass sie in dem betrachteten Augenblick derjenigen des Körpers, auf den die Bewegung des andern zu beziehen ist, gleich und entgegengesetzt ist. Dann bleibt dieser in Ruhe. Der andere aber besitzt zwei Bewegungen zugleich, seine ursprüngliche und die ihm nachher gemeinschaftlich mit dem andern ertheilte oder ertheilt gedachte. Beide Bewegungen lassen sich nach dem vorigen §. in eine einzige zusammenfassen, welche, da sich jetzt der andere Körper in Ruhe befindet, eben die auf diesen bezogene relative Bewegung ist.

Bleiben wir bei dem bereits angeführten Beispiele stehen, und suchen wir die relative Bewegung des Wassertheilchens A (Fig. 5), welches eben gegen die Schaufel BB des Wasserrads trifft, in Bezug auf diese Schaufel oder genauer in Bezug auf den Punkt A derselben, wo es sie trifft. AD sei in dem betrachteten Augenblick die Grösse und Richtung der Geschwindigkeit des Punktes A der Schaufel (senkrecht auf den von A nach der Achse des Rades gezogenen Radius), AC die des Wassertheilchens. Die, beiden Körpern gemeinschaftlich zu ertheilende Bewegung muss in diesem Augenblick eine der AD gleiche und entgegengesetzte Geschwindigkeit AD′ haben. Wenn aber das Wassertheilchen die Geschwindigkeiten AC und AD′ zugleich besitzt, so ist dies ebenso, als wenn es sich mit der Geschwindigkeit AG, der Diagonale des Parallelogramms aus jenen beiden, fortbewegte. Dieses AG ist in dem betrachteten Augenblick nach Grösse und Richtung die Geschwindigkeit der relativen Bewegung des Wassertheilchens in Bezug auf die Schaufel. Die Einwirkung des ersteren auf die letztere ist genau so, als

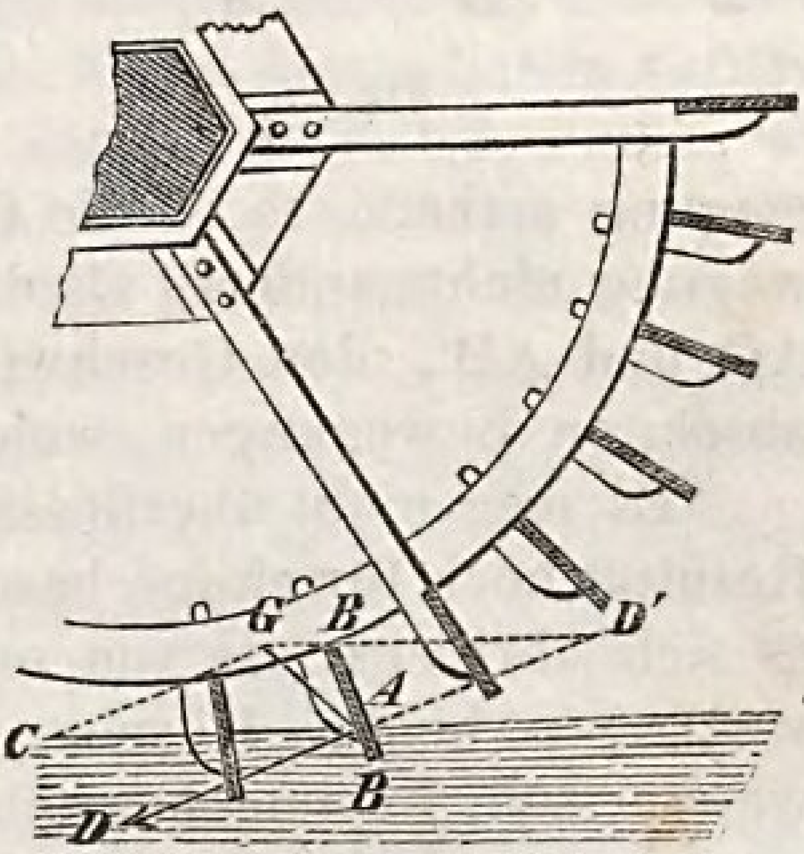


Fig. 5.

wenn die Schaufel ruhig stünde, und das Wassertheilchen mit einer Geschwindigkeit gegen sie stosse, deren Grösse und Richtung AG ist.

Im Allgemeinen folgt also hieraus folgender Satz: Um die relative Bewegung eines Körpers gegen einen andern, selbst bewegten, zu erhalten, denke man sich dem ersteren neben seiner ursprünglichen absoluten Bewegung eine zweite Bewegung ertheilt, die der des letzteren Körpers in jedem Augenblick gleich und entgegengesetzt ist, und vereinige beide gleichzeitige Bewegungen in eine.

Dass dieses Resultat mit dem des vorigen §. nicht nur nicht im Widerspruch steht, sondern schon aus jenem hätte hergeholt werden können, ist leicht zu zeigen. Denkt man sich in Fig. 6, welche, in ihren ausgezogenen Linien wenigstens, eine Wiederholung der Haupttheile der Fig. 4 ist, die Geschwindigkeit AD rückwärts als AD′ aufgetragen, d. h. denkt man sich der Kugel eine, dem Schiffe entgegengesetzte Bewegung ertheilt, so ist die Geschwindigkeit AE der relativen Bewegung nichts anderes als die Diagonale des Parallelogramms über AG und AD′, den Geschwindigkeiten der beiden gleichzeitigen absoluten Bewegungen, welche sie jetzt besitzt.

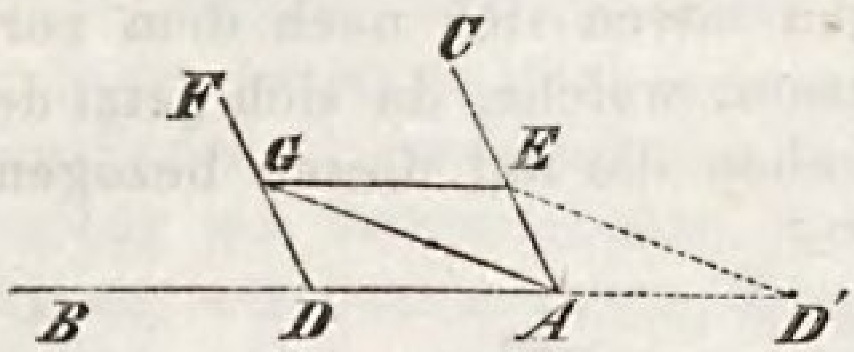


Fig. 6.

Es mag nicht überflüssig sein, das oben gefundene allgemeine Resultat noch für einige besondere Fälle auszusprechen, bei denen es sich übrigens fast von selbst versteht. Wenn die absoluten Bewegungen beider Körper, deren relative Bewegung gefunden werden soll, in dem betrachteten Augenblick in parallelen Richtungen vor sich gehen, so ist die Geschwindigkeit ihrer relativen Bewegung gleich der Summe oder Differenz ihrer absoluten, je nachdem letztere nach entgegengesetzten oder nach den nämlichen Richtungen hin stattfinden. Zwei hinter einander herfahrende Eisenbahnzüge von 50 und 30 Fuss Geschwindigkeit in der Secunde haben eine relative Geschwindigkeit von 20 Fuss; zwei sich begegnende Züge dagegen von jenen Geschwindigkeiten treffen mit einer relativen Geschwindigkeit von 80 Fuss aufeinander. In dem Falle, wo die Geschwindigkeiten der parallel und gleich gerichteten, absoluten Bewegungen gleichgross sind, ist die Geschwindigkeit der relativen Bewegung Null, d. h. die Körper sind, in dem betrachteten Augenblick wenigstens, in relativer Ruhe.

Erste Begriffe von den Kräften.

§. 19. **Gesetz der Trägheit.** — Ein Körper, der in Ruhe ist, kann nicht von selbst anfangen sich zu bewegen.

Ein Körper, der in Bewegung ist, kann diese Bewegung nicht aus sich selbst abändern.

Diese beiden Sätze enthalten das Gesetz der Trägheit, das zuerst von *Galilei* im Jahre 1638 ausgesprochen wurde und für die Entwickelung der Mechanik von der grössten Wichtigkeit geworden ist, da erst seit seiner Entdeckung eine richtige Einsicht in das Verhältniss zwischen den Körpern oder eigentlich dem Stoffe, der Materie, aus denen dieselben bestehen, und den Kräften gewonnen wurde. Der erste Satz ist klar genug und wird von Jedermann leicht zugegeben werden. Zwar weiss man, dass die Menschen und Thiere willkürlich aus dem Zustande der Ruhe in den der Bewegung übergehen können, aber diese Eigenschaft, welche sie besitzen, gehört nicht wesentlich der Materie an, aus der sie bestehen; sie hängt von jenem nichtmateriellen Theil ihres Seins ab, den man das Leben nennt. Wenn dieses Leben aufhört, so befinden sich ihre Körper unter denselben Bedingungen, wie der Stein, das Wasser u. s. w.; sie sind nicht mehr fähig, von selbst aus dem Zustande der Ruhe in den der Bewegung überzugehen.

Den zweiten Satz müssen wir etwas näher erörtern, damit er von Jedermann gehörig verstanden und vollständig zugegeben werde. Wenn ein Körper, den wir uns in Gedanken auf einen materiellen Punkt reducirt denken, eine gewisse Bewegung besitzt, und es ist keinerlei innere oder äussere Ursache vorhanden, die diese Bewegung abzuändern sucht, so folgt aus unserem Princip, dass der Körper nothwendig eine gerade Linie beschreiben muss, und dass die Stücke dieser geraden Linie, welche er in gleichen Zeiten durchläuft, gleich sind, d. h. dass seine Bewegung gleichförmig ist. Denn denken wir uns das kleine Wegstückchen, das der Körper während einer sehr kurzen Zeit beschreibt, so kann dasselbe jedenfalls als gerade Linie betrachtet werden, und es ist kein Grund vorhanden, warum der Körper bei der Fortsetzung seiner Bewegung in einem Sinn mehr als in einem andern von der Richtung dieser geraden Linie abweichen sollte. Wenn man eine Kugel auf gut geebnetem, horizontalem Boden in Bewegung setzt, so ist ihre Bahn eine gerade Linie; sie wird von dieser geraden Linie nur dann abweichen, wenn sie einem Hinderniss begegnet, welches sich der Fortsetzung ihrer Bewegung in dem

ursprünglichen Sinne entgegensetzt. Ueberall, wo sich ein Körper in krummer Linie bewegt (ein schief geworfener Stein z. B., die Planeten in ihrer Bahn um die Sonne), da müssen wir auf eine äussere Ursache schliessen, welche ihn fortwährend aus der geraden Richtung ablenkt. Von dem Augenblick an, wo der Körper in irgend einer Stelle B seiner Bahn (Fig. 3, S. 16) sich selbst überlassen bliebe, würde er in der Richtung BT des letzten kleinen Wegstückchens AB, das er zurückgelegt hat, und das man als gerade betrachten kann (vgl. §. 11), d. h. in der Richtung der Tangente an seine Bahn im Punkte B geradlinig und gleichförmig fortgehen.

Das andere, dass ein in Bewegung gesetzter und hierauf sich selbst überlassener Körper fortwährend dieselbe Geschwindigkeit behält, ist vielleicht schwieriger einzusehen denn in dem Beispiel, das wir eben angeführt haben, wo eine Kugel über den horizontalen Boden rollt, sieht man stets, wie die Bewegung nach und nach immer langsamer wird und endlich ganz aufhört. Aber man wird auch bemerken, dass die Kugel bei demselben Aufwand von Kraft, mit der sie in Bewegung gesetzt wird, um so weiter auf dem Boden fortrollt, je glatter derselbe ist. Die Ursache der Verzögerung der Bewegung liegt also nicht in der Kugel selbst, sondern die Unebenheiten des Bodens und der Widerstand der Luft, welche die Kugel zu durchschneiden hat, sind es, welche, indem sie sich der Bewegung entgegensetzen, dieselbe mehr und mehr verzögern und endlich gänzlich vernichten.

§. 20. **Kräfte.** — Um einen Körper in Bewegung zu setzen, oder um die Bewegung, die er bereits hat, abzuändern, ist also eine Ursache nöthig. Diese Ursache, welcher Art sie auch sei, nennt man Kraft. Eine Kraft ist also jede Ursache einer Bewegung oder Bewegungsänderung.

Die Kräfte, mit denen wir uns beschäftigen werden, sind verschiedener Art:

1) Wenn man einen Körper, den man in der Hand hält, loslässt, so fällt er zu Boden. Die Kraft, welche diese Bewegung hervorbringt, heisst Schwerkraft oder die Schwere. Ihrer Wirkung sind alle Körper, welche sich um uns befinden, unterworfen. Sie ist es auch, welche die Bewegung des Wassers in den fliessenden Gewässern, Bächen, Flüssen und Strömen bestimmt.

Die Linie, welche ein frei herabfallender Körper, den wir uns in Gedanken auf einen materiellen Punkt reducirt denken, beschreibt, ist gerade; ihre Richtung heisst die Vertikale. Sie ist überall, auf der Oberfläche der ganzen Erde, nach dem Mittel-

punkt derselben gerichtet. In der Praxis kann man jedoch zwei nicht allzuweit von einander entfernte Vertikallinien als parallel ansehen. Man bestimmt die vertikale Richtung mittelst des sog. Bleilothes oder des Senkels (Fig. 7), ein sehr einfaches Instrument, das aus einem kleinen schweren Körper (einer Bleikugel z. B.), der an einer Schnur aufgehängt ist, besteht.

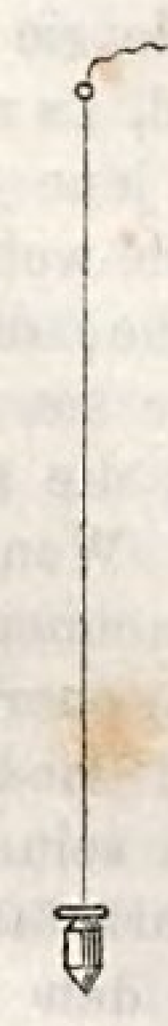


Fig. 7.

Die Ebene, auf welcher eine Vertikallinie senkrecht steht, heisst Horizontalebene. Jede in derselben liegende gerade Linie nennt man Horizontallinie. Die Oberfläche des Wassers in einem ruhig stehenden Gefäss kann als Horizontalebene genommen werden. Um zu untersuchen, ob eine Linie oder eine Fläche nach einer gewissen Richtung hin horizontal ist, setzt man eine sog. Setzlatte mit Setzwage (Fig. 8) darauf. Erstere, AA, ist eine genau gerade, unten und oben parallel abgehobelte Latte. Letztere ein gleichschenkliches Dreieck BBB, von dessen Spitze an einer Schnur eine kleine Bleikugel herabhängt. Wenn die Bleikugel in die durch ein Loch oder eine Marke bezeichnete Mitte der Grundlinie des Dreiecks einspielt, so steht die Setzlatte horizontal.

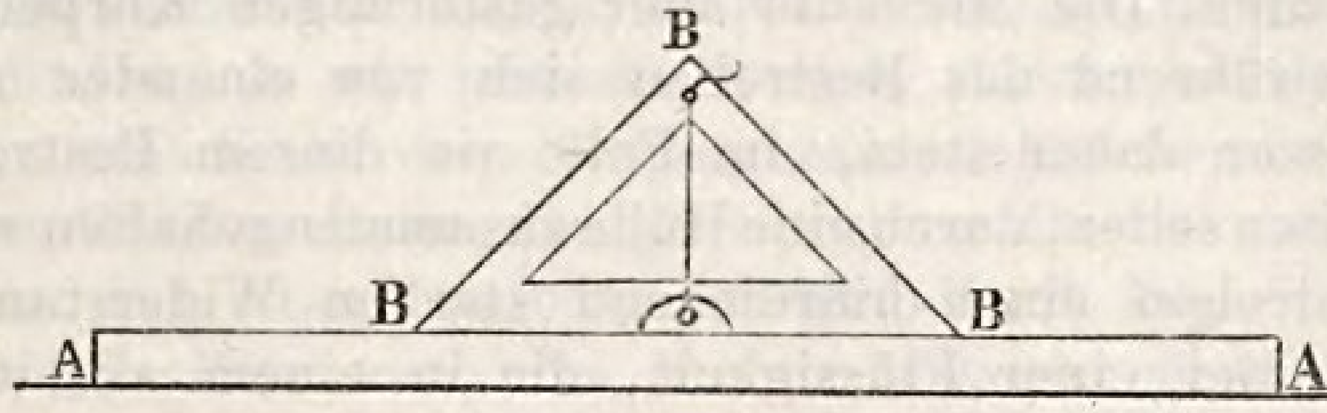


Fig. 8.

In der Technik benützt man die Schwerkraft bei den durch Gewichte bewegten Uhren, bei dem Betrieb von Mühlen und anderen Fabriken durch Wasserräder, Turbinen, Wassersäulen-Maschinen u. s. w.

2) Wenn man die Gestalt eines festen Körpers, einer Stahlklinge z. B., indem man sie biegt, abändert, so nehmen die Moleküle des Körpers eine andere gegenseitige Stellung ein. Sie nähern sich z. B. an der concaven Seite der gebogenen Stahlklinge und entfernen sich von einander an ihrer convexen. Wenn dabei die Elasticitätsgrenze nicht überschritten wurde, so nimmt der Körper, sich selbst überlassen, seine vorige Gestalt wieder an. Dabei bewegen sich jetzt seine Moleküle in entgegengesetzter Richtung wie vorhin, aber nicht mehr in Folge äusserlich einwirkender Ursachen, sondern aus Anlass gewisser innerer zwischen ihnen selbst thätiger Kräfte, die man desshalb Molekularkräfte nennt, und zwar attractive oder anziehende, im

Falle sie die Entfernung der Moleküle, zwischen denen sie thätig sind, zu verkleinern, und repulsive oder abstossende, wenn sie jene Entfernung zu vergrössern suchen. Erstere nennt man auch wohl Cohäsions-, letztere Depressionskräfte. Bei jedem Versuche, die Moleküle eines festen Körpers einander zu nähern oder sie von einander zu entfernen, treten jene Molekularkräfte auf, die sich diesem Vorhaben entgegensetzen.

Wenn man in einem allseitig geschlossenen Gefässe ein Gas zusammendrückt, durch Herabschieben des Stempels z. B. in einem Luftfeuerzeug (Fig. 2, S. 12), und gibt ihm hierauf Gelegenheit, sich wieder auszudehnen, so dehnt es sich in der That aus, indem sich seine Moleküle in Folge der zwischen ihnen thätigen Molekularkräfte repulsiver Art wieder von einander entfernen. Aber bei den gasförmigen Körpern werden diese Depressionskräfte nicht erst durch die vorhergegangene Zusammendrückung wach gerufen. Die Moleküle aller gasförmigen Körper haben vielmehr fortwährend das Bestreben sich von einander zu entfernen und müssen daher stets, im Falle sie diesem Bestreben nicht Folge leisten sollen, durch eine Hülle zusammengehalten werden, die diesem Bestreben einen hinreichend starken Widerstand entgegensetzt.

Bei einer Flüssigkeit, die in einem allseitig geschlossenen Gefäss enthalten ist, machen sich bei einem Versuche, sie zusammenzudrücken, gleichfalls die Depressionskräfte zwischen den Molekülen geltend, und zwar hier sofort mit solch ungeheuerer Stärke, dass die flüssigen Körper fast gar nicht zusammengedrückt werden können (§. 8). Beim Nachlassen des äusseren Druckes entfernen sich die Moleküle in Folge jener Kräfte sofort um die sehr kleine Grösse, um welche sie sich vorhin genähert haben, wieder von einander, aber nicht weiter.

In der Technik ist es besonders die Depressionskraft zwischen den Molekülen des Wasserdampfes, die in den Dampfmaschinen ihre Anwendung findet. Dann auch die Repulsivkraft zwischen den Molekülen erhitzter Luft, in den calorischen Maschinen. Die Elasticität fester Körper wird namentlich bei Benützung gespannter Federn, in den Uhren z. B., angewendet. Die bei dem Versuch einer Zusammendrückung flüssiger Körper auftretende Depressionskraft ist es endlich, die bei den hydraulischen Pressen die Hauptrolle spielt.

3) Bei den elektrischen und magnetischen Erscheinungen beobachtet man ebenfalls anziehende und abstossende Kräfte. Eine Siegellackstange, mit Tuch oder Wolle gerieben, zieht kleine, leichte Hollundermarkstückchen, ein Magnet ein Stückchen Eisen

an. Die Kräfte, welche diese Bewegungen hervorbringen, sind die elektrischen und magnetischen Kräfte. Sie finden ihre Anwendung bei den Telegraphen und den elektromagnetischen Maschinen.

4) Eine vierte Art von Kräften endlich sind diejenigen, welche von Menschen und Thieren, die man zusammen unter dem Namen der thierischen Motoren begreift, entwickelt werden. — Ihre mannichfaltige Anwendung in der Technik ist bekannt genug.

§. 21. **Druck und Zug, Spannung.** — Eine Kraft, welche an einem Körper wirkt, ist nicht immer im Stande, denselben in Bewegung zu setzen. Wenn z. B. ein Stein auf einen Tisch gelegt wird, so bleibt er ruhig darauf liegen. Gleichwohl ist er noch immer der Einwirkung der Schwere unterworfen; denn wenn man sich denkt, dass der Tisch plötzlich verschwände, so würde der Stein alsbald zu Boden fallen. Ein Stein, welcher an dem untern Ende einer Schnur befestigt ist, deren oberes Ende mit einem festen Punkt verbunden wurde, bleibt gleichfalls in Ruhe. Er fällt aber zu Boden, so wie man die Schnur durchschneidet. Allemal nun, wenn eine Kraft dem Körper, auf welchen sie wirkt, keine Bewegung mittheilen kann, bringt sie einen Druck oder einen Zug hervor. Der Stein, welcher auf dem Tisch liegt, übt einen Druck auf denselben aus; der Stein, welcher an einer Schnur aufgehängt ist, bringt einen Zug oder eine Spannung an derselben hervor. Wenn ein Mann eine Last aufzuheben sucht, die zu schwer für ihn ist, so übt er an den Punkten, wo er sie mit den Händen berührt, einen Druck gegen sie aus. Ein Gas, welches in einem allseitig geschlossenen Gefäss enthalten ist, übt in Folge seines Bestrebens sich auszudehnen, einen Druck gegen die Innenseite der Wände des Gefässes aus, den man die Spannung oder Spannkraft des Gases nennt.

§. 22. **Gewicht.** — Wenn ein Körper, auf den blos die Schwerkraft einwirkt, durch irgend ein Mittel am Fallen gehindert wird, so nennt man den Druck oder Zug, den er dabei ausübt, sein Gewicht. Hiebei mag sogleich bemerkt werden, dass man sich hüten muss, die Worte Schwere und Gewicht mit einander zu verwechseln: das Wort Schwere bezeichnet die allgemeine Ursache, welche das Fallen der Körper an der Erdoberfläche veranlasst; Gewicht hingegen bezeichnet nur eine Wirkung jener allgemeinen Ursache, ausgeübt auf einen einzelnen Körper.

Das Gewicht eines Körpers kann mit Hülfe des in Fig. 9 dargestellten Instrumentes anschaulich gemacht werden. Dasselbe besteht aus einer Stahlschiene, die in der Mitte umgebogen ist und einen gewissen Grad von Biegsamkeit besitzt. Am Ende des

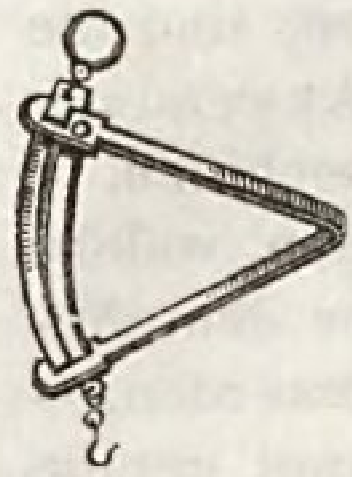


Fig. 9.

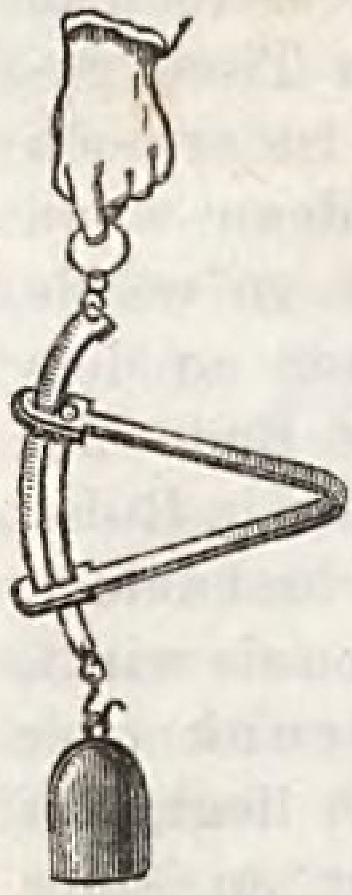


Fig. 10.

unteren Arms ist ein Bogen von Eisen befestigt, welcher frei durch eine Oeffnung des oberen Arms hindurchgeht und in einen Ring endigt. Nahe am Ende des oberen Arms ist ein zweiter Bogen von Eisen befestigt, der durch eine Oeffnung des unteren Arms frei hindurchgeht und in einen Haken ausläuft. Wenn man dieses Instrument an dem Ring festhält und an den Haken einen Körper aufhängt, so wird das Gewicht dieses Körpers die durch die Stahlschiene gebildete Feder biegen; die Enden beider Arme werden sich nähern und das Instrument die in Fig. 10 abgebildete Form annehmen.

Indem man auf diese Weise nach und nach verschiedene Körper an dem Hacken aufhängt, wird man sehen, dass sich die beiden Enden der Feder bald mehr, bald weniger nähern. Wenn sie sich aber unter dem Einfluss der Gewichte verschiedener Körper bis auf dieselbe Entfernung nahe kommen, so wird man daran erkennen, dass die Gewichte dieser Körper einander gleich sind. Hängt man alsdann zwei von diesen Körpern mit gleichen Gewichten zugleich an den Hacken, so wird natürlich die Feder mehr gebogen, als unter dem Einflusse eines einzigen derselben; und wenn dann ein Körper für sich allein dieselbe Biegung hervorbringt, als jene zwei zusammen, so muss ihm offenbar das doppelte Gewicht von jedem der beiden ersteren zugeschrieben werden. Ebenso wird man sagen, ein Körper habe das dreifache, vierfache etc. Gewicht von jedem der ersteren Körper, wenn er an der Feder die nämliche Biegung hervorbringt, als drei, vier etc. von jenen Körpern zusammen.

Die Einheit des Gewichtes ist im metrischen Maasssystem das Gramm, das Gewicht eines Cubikcentimeters reinen Wassers bei der Temperatur 4^{0} C. Es wird eingetheilt in 10 Deci-, 100 Centi- und 1000 Milligramme. 1000 Gramme heissen 1 Kilogramm. Bei sehr schweren Körpern, Schiffslasten z. B., gebraucht man als Einheit die Tonne = 1000 Kilogramm.

In anderen Gewichtssystemen heisst die Einheit gewöhnlich Pfund, ein willkürliches, in verschiedenen Ländern sehr verschiedenes Maass, das auch in verschiedener Weise eingetheilt wird. Im deutschen Zollverein ist das Zollpfund eingeführt = 500 Gramm oder $^1/_2$ Kilogramm. Der Zollcentner hat 100 Zollpfunde. Die Tabelle IV am Schlusse dieses Werkes gibt eine

Vergleichung der verschiedenen Pfunde unter sich und mit dem Kilogramm.

Es ist leicht, mit Hilfe eines Instrumentes wie das in Fig. 9 abgebildete, zu ermitteln, wie viel Gramme oder Kilogramme irgend ein Körper wiegt. Der grösseren Bequemlichkeit halber markirt man sich auf dem äussern Bogen, der oben in den Ring endigt, die Punkte, bis zu welchen das Ende des oberen Armes herabgebogen wird, wenn man an dem Haken nach und nach Gewichte von 1 Kilogramm 2, 3 Kilogramm etc. aufhängt. Wenn man dann irgend einen Körper an den Haken hängt und zusieht, bis zu welchem Punkte des äussern Bogens das Ende des oberen Armes herabgebogen wird, so erfährt man dadurch unmittelbar das Gewicht des aufgehängten Körpers. In solcher Weise gebraucht, heisst das Instrument Federwage. Die Einrichtung der in der Praxis gebrauchten derartigen Instrumente ist ziemlich mannichfaltig. Alle aber laufen darauf hinaus, dass durch das angehängte Gewicht eine Feder mehr oder weniger gebogen wird. Diese Biegung wird entweder direkt gemessen, wie bei obigem Instrument, oder es wird ein Zeiger in Bewegung gesetzt, der dann auf einem Zifferblatt das Gewicht des angehängten Körpers angibt. Es kann daher wohl unterlassen werden, näher auf die in Rede stehenden Instrumente einzugehen, um so mehr, da ihre Einrichtung und ihr Gebrauch, wenn man ein Exemplar derselben vor sich hat, immer sehr leicht zu verstehen ist. Nur das möge noch bemerkt werden, dass das Gewicht des Körpers, für welchen man die Federwage anwendet, niemals so gross sein darf, dass die Elasticitätsgrenze der Feder überschritten würde. Dieselbe würde dadurch bleibend verbogen und das Instrument verdorben werden. Man wird sich daher sehr biegsamer Federn nur für leichte Körper bedienen und dagegen Federn von um so geringerer Biegsamkeit anwenden, je schwerer die zu wiegenden Körper sind.

§. 23. **Maass der Kräfte, Dynamometer.** — Welcher Art auch eine Kraft ist, so wird man den Druck oder Zug, welchen sie hervorbringt, doch immer mit dem Gewichte eines Körpers vergleichen und in Kilogrammen ausdrücken können. Wenn ein Pferd an einem Seil zieht, welches an einem in Bewegung zu setzenden Körper befestigt ist, so kann man sich das Seil an einer Stelle durchschnitten und die dadurch erhaltenen Enden, das eine mit dem Ring, das andere mit dem Hacken des oben beschriebenen Instrumentes verknüpft denken (Fig. 11). Die Zugkraft wird alsdann erst durch Vermittelung dieses Instrumentes auf den Körper ausgeübt; die Feder wird gebogen, und die Spannung



Fig. 11.

des Seiles wird dem Gewichte jenes Körpers gleichzusetzen sein, der, an dem Haken aufgehängt, dieselbe Biegung der Feder hervorbringt. Diese Spannung kann also durch eine gewisse Anzahl von Kilogrammen ausgedrückt werden.

Man nimmt für das Maass einer Kraft die Grösse des Drucks oder Zugs, welchen sie hervorbringt, wenn der Körper, auf welchen sie wirkt, in Ruhe bleibt. So wurde schon oben die Kraft, in Folge deren die Körper fallen, durch das Gewicht dieser Körper gemessen; so wird auch in dem eben betrachteten Beispiel die Zugkraft des Pferdes durch die Spannung des Seiles gemessen. Es kann also jede Kraft durch eine gewisse Anzahl von Kilogrammen oder Gewichtseinheiten überhaupt ausgedrückt werden.

Dies gilt auch von dem Drucke, welchen luftförmige Körper gegen die Fläche ausüben, mit der sie in Berührung stehen. Nur ist so viel klar, dass dieser Druck hier der Grösse der Fläche proportional ist, da er gleichmässig an allen Punkten derselben stattfindet. Man gibt desshalb hier gewöhnlich den Druck auf die Flächeneinheit, Quadratmeter, Quadratfuss oder -Zoll, an und erhält dann den Druck auf jede Fläche, wenn man jenen mit der Grösse der Fläche multiplicirt. In manchen Fällen misst man den Druck luftförmiger Körper auch dadurch, dass man die Höhe einer Wasser- oder Quecksilbersäule bei der Temperatur 0° C. angibt, welche, über der in Betracht genommenen Fläche stehend, durch ihr Gewicht denselben Druck ausübt wie das Gas. Die Tabelle V am Schlusse gibt eine Vergleichung verschiedener Maasseinheiten des Druckes. Sie ist leicht zu verstehen und mittelst der Tabellen I—IV zu erweitern; wir haben nur hinzuzufügen, dass man unter einer Atmosphäre hier vorläufig nur eine höhere Einheit für den Druck von luftförmigen Körpern zu verstehen hat.

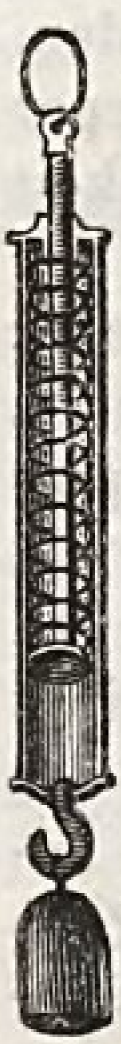


Fig. 12.

Um die Zahl der Gewichtseinheiten zu finden, durch welche eine Kraft ausgedrückt wird, bedient man sich in der That ähnlicher Instrumente wie der Federwagen. Man nennt sie gewöhnlich Kraftmesser oder Dynamometer. Die Form der dabei angewendeten Federn ist ziemlich verschieden. Die in Fig. 12 abgebildete ist eine schraubenförmig gewundene oder, wie sie auch genannt wird, eine Spiralfeder, die in einen hohlen Cylinder eingeschlossen

ist. Mitten durch sie hindurch geht, ihrer ganzen Länge nach, ein Stab, der mit der Achse des Cylinders zusammenfällt und unten in einem Knopf endigt, an dem das untere Ende der Feder befestigt ist. Das obere Ende des Stabs ist mit einem Ring versehen, an welchem das Instrument aufgehängt werden kann. Der Cylinder, welcher sich mit seinem oberen Theil gegen das oberste Ende der Spiralfeder stützt, trägt unten einen Haken, an welchem die Kraft angebracht werden kann, die gemessen werden soll. Es ist klar, dass der Stab mehr oder weniger aus dem Cylinder heraustreten wird, je nachdem derselbe unter dem Einfluss einer grösseren oder geringeren Kraft steht. Man kann diesen Stab vorher mit einer Eintheilung versehen, indem man an dem Haken des Cylinders nach und nach verschiedene Körper von bekanntem Gewicht aufhängt.

Wenn man den Knopf, in welchen sich die Stange unten endigt, durch einen Kolben ersetzt, welcher an den Wänden des genau ausgebohrten Cylinders luftdicht anschliesst und in den unteren Theil des festgemachten Cylinders, von dem natürlich der Haken mit dem Gewichte weggenommen ist, Gas oder Dampf von bestimmter Spannung treten lässt, so schieben dieselben den Stempel hinauf und drücken dadurch die Feder zusammen. An der Grösse dieser Zusammendrückung kann alsdann die Grösse des Druckes des Gases auf die Fläche des kleinen Kolbens, also seine Spannung, erkannt werden. Dies ist im Allgemeinen das Princip, welches dem Dampfmaschinen-Indicator zu Grunde liegt, den wir später genauer kennen lernen werden. Im Uebrigen heisst man diejenigen Instrumente, welche zum Messen der Druckkräfte luftförmiger Körper dienen, Manometer; wir werden dieselben bei einer andern Gelegenheit näher kennen lernen.

Fig. 13 zeigt den *Regnier*'schen Dynamometer, meist zum Messen von Zugkräften an Fahrzeugen angewendet. Die zu messende Zugkraft wirkt an dem Bügel ABCD in einer der beiden durch Pfeile angedeuteten Richtungen, während der zu

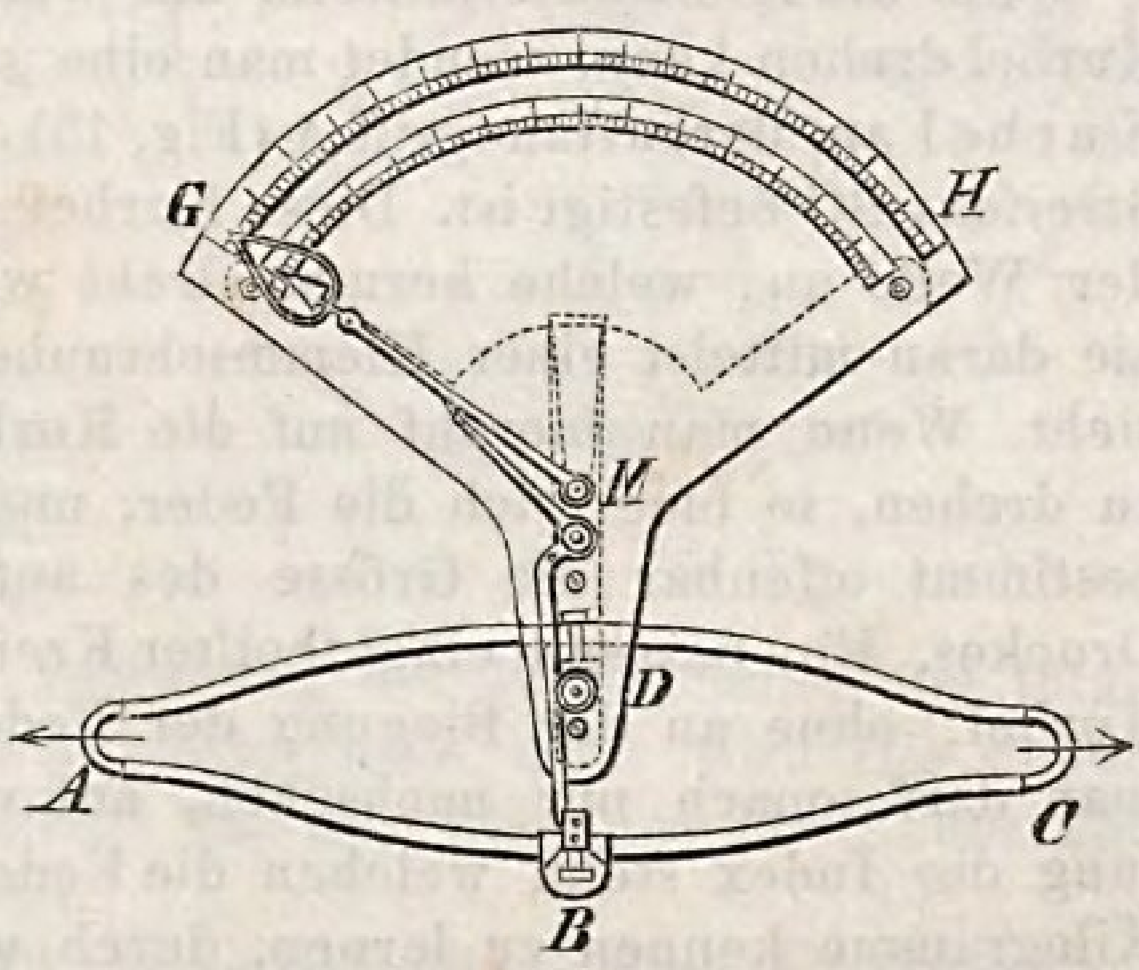


Fig. 13.

überwindende Widerstand in der entgegengesetzten thätig ist. Dadurch werden die Mitten B und D mehr oder weniger genähert und bringen auf eine aus der Figur von selbst verständliche Weise eine Bewegung des Zeigers MG hervor, der an dem Gradbogen HG die Grösse der wirkenden Kraft angibt.

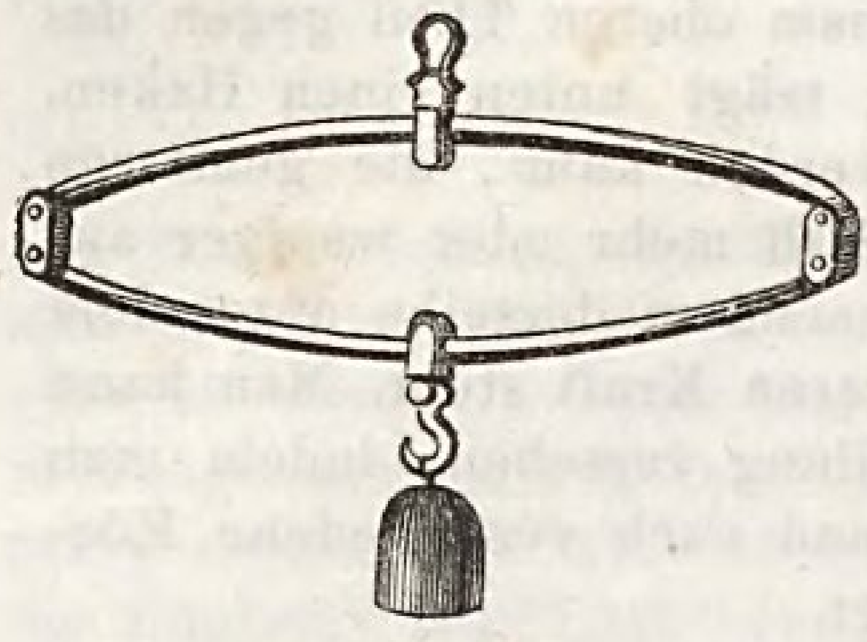


Fig. 14.

Die Fig. 14 stellt zwei Stahlschienen dar, deren Enden in zwei Stücken, die eine Art Zwingen bilden und hier Federhaupt heissen, mittelst Bolzen mit einander verbunden sind. An der einen dieser Schienen ist wieder ein Ring, an der andern ein Haken befestigt. Die Mitten dieser Schienen entfernen sich offenbar mehr oder weniger von einander, je nachdem die Zugkraft, welche an dem Haken wirkt, grösser oder kleiner ist. Diese letztere Einrichtung, welche von *Poncelet* zuerst angegeben wurde, besitzt eine für experimentelle Untersuchungen über die Grösse von Kräften sehr schätzbare Eigenschaft, welche darin besteht, dass die Vergrösserung der Entfernung der Mittelpunkte der beiden Schienen proportional der Grösse der auf das Dynamometer wirkenden Kraft ist. Wenn eine Kraft von 1 Kilogramm die Entfernung dieser Punkte um einen Millimeter vermehrt, so vergrössert eine Kraft von 2 Kilogramm ihre Entfernung um 2 Millimeter, eine Kraft von 3 Kilogramm um 3 Millimeter u. s. f. bis zu einer gewissen Grenze, welche die Grösse der Kraft nicht überschreiten darf.

Um die Kraft zu ermitteln, mit welcher ein Mensch an einer Kurbel drehen kann, wendet man eine sog. dynamometrische Kurbel an, deren Handgriff A (Fig. 15) am Ende eines federnden Streifens BC befestigt ist. Diese Kurbel bringt man an dem Ende der Welle an, welche herumgedreht werden soll, und befestigt sie daran mittelst einer Klemmschraube, die man in der Figur sieht. Wenn man hierauf auf die Kurbel wirkt, um die Welle zu drehen, so biegt sich die Feder, und die Grösse ihrer Biegung bestimmt offenbar die Grösse des auf die Kurbel ausgeübten Druckes. Ein passend eingetheilter Kreisbogen dreht sich mit der Kurbel, ohne an der Biegung der Feder mit Theil zu nehmen; man darf sonach nur nachsehen, auf welchem Punkt der Theilung der Index steht, welchen die Feder trägt, um die Zahl der Kilogramme kennen zu lernen, durch welche der Druck auf die Kurbel ausgedrückt wird. Die Dynamometerkurbel ist zuerst von

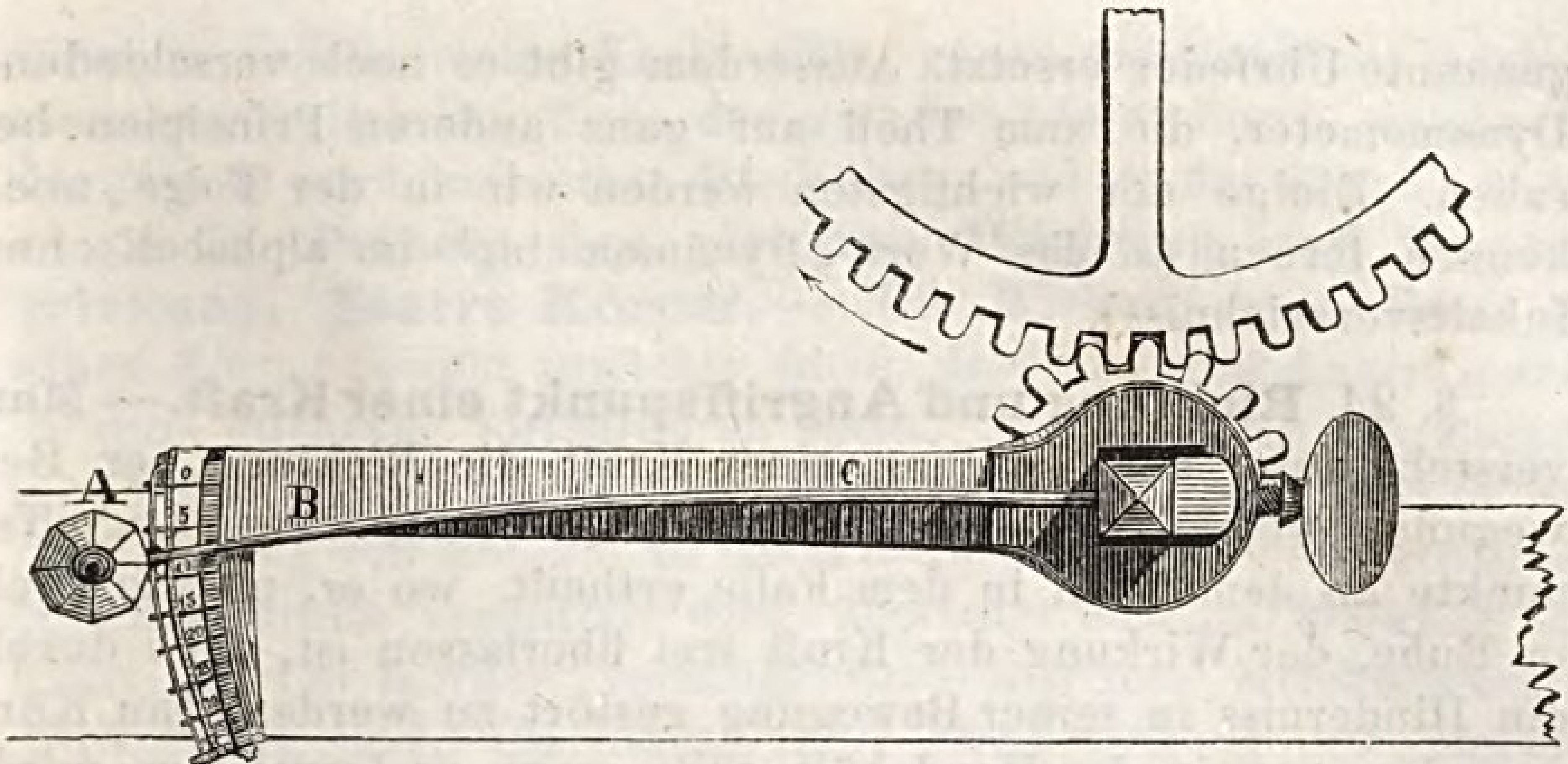


Fig. 15.

Regnier in der in der Figur abgebildeten Gestalt gebraucht und später von *Morin* verbessert worden.

Ein ähnliches Princip benützte *Morin* bei seinen Rotations-Dynamometern, die im Allgemeinen den Zweck haben, die Kraft zu ermitteln, welche zur Bewegung einer Arbeitsmaschine, einer Drehbank, Hobelmaschine etc. nothwendig ist. Die Fig. 16 gibt ein ungefähres Bild davon. A ist eine Welle, auf welcher die Riemscheibe *a* steckt, durch deren Riemen die zu messende Maschine bewegt werden soll. Die Riemscheibe sitzt aber nur lose auf der Welle, so dass sie sich nicht mit derselben herumdrehen würde, wenn nicht die an der Welle einerseits und andererseits an dem Kranz der Riemscheibe befestigte Blattfeder *b* die Verbindung zwischen letzterer und der Welle vermittelte. Aber es ist klar, je grösser die Kraft ist, welche zur Bewegung der Riemscheibe und folglich der Maschine erforderlich ist, desto mehr wird die Feder gebogen, wie denn umgekehrt aus der Biegung der Feder auf jene Kraft geschlossen wird.

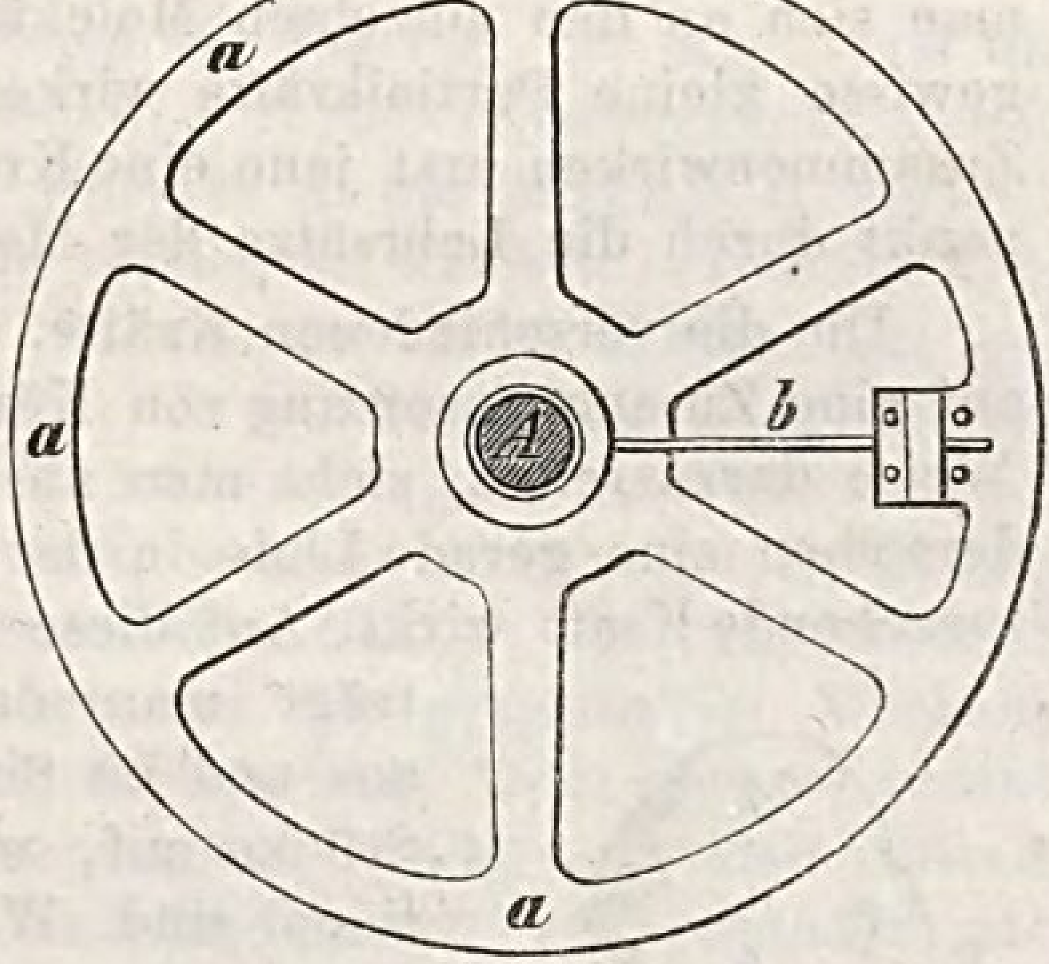


Fig. 16.

Bei dem *White*'schen Dynamometer, der zu ähnlichen Zwecken dient, ist die Blattfeder durch eine spiralförmig gewundene, so-

genannte Uhrfeder ersetzt. Ausserdem gibt es noch verschiedene Dynamometer, die zum Theil auf ganz anderen Principien beruhen. Einige der wichtigsten werden wir in der Folge noch kennen lernen (s. das Wort „Dynamometer" im alphabetischen Inhaltsverzeichniss).

§. 24. **Richtung und Angriffspunkt einer Kraft.** — Man versteht unter der Richtung einer Kraft die Richtung der Bewegung, welche sie einem Körper oder besser ihrem Angriffspunkte an demselben in dem Falle ertheilt, wo er, ursprünglich in Ruhe, der Wirkung der Kraft frei überlassen ist, ohne durch ein Hinderniss in seiner Bewegung gestört zu werden. Ein Körper, den man in der Hand hält, fällt, wenn er losgelassen wird, herab und beschreibt dabei eine gerade vertikale Linie; diese Vertikale ist die Richtung der Kraft, welche den Körper fallen macht.

Unter Angriffspunkt einer Kraft versteht man diejenige Stelle des Körpers, auf welche sie unmittelbar einwirkt; also den Ort z. B., wo das Seil festgemacht ist, an welchem ein Körper in die Höhe gezogen wird. Wenn eine Kraft zu gleicher Zeit viele oder gar alle Theile eines Körpers ergreift, wie der von einem Gase ausgeübte Druck oder wie die Schwerkraft, da hat man sich an den einzelnen Molekülen oder Stellen des Körpers gewisse kleine Partialkräfte wirkend zu denken, die in ihrem Zusammenwirken erst jene eine Kraft ausmachen, deren Angriffspunkt durch die Lehrsätze der Mechanik zu finden ist.

Um die verschiedenen Kräfte, welche auf einen Körper oder auf eine Zusammensetzung von Körpern wirken, in anschaulicher Weise darzustellen, zieht man aus dem Angriffspunkte von jeder derselben eine gerade Linie in der Richtung, in welcher die entsprechende Kraft wirkt. Auf diese verschiedenen geraden Linien trägt man dann, von dem Angriffspunkt aus und im Sinne der Wirkung der Kräfte, Stücke auf, welche diesen Kräften proportional sind. Wenn man z. B. übereinkommt, eine Kraft von 1 Kilogramm durch eine Länge von 1 Centimeter darzustellen, so bezeichnet die Figur 17, dass der Körper M von 3 Kräften P, Q, R angegriffen wird, welche bezüglich gleich 2^k, 3^k, 1^k sind, deren Angriffspunkte in A, B, C liegen, und deren Richtungen durch die von diesen drei Punkten ausgehenden geraden Linien dargestellt werden. Um den

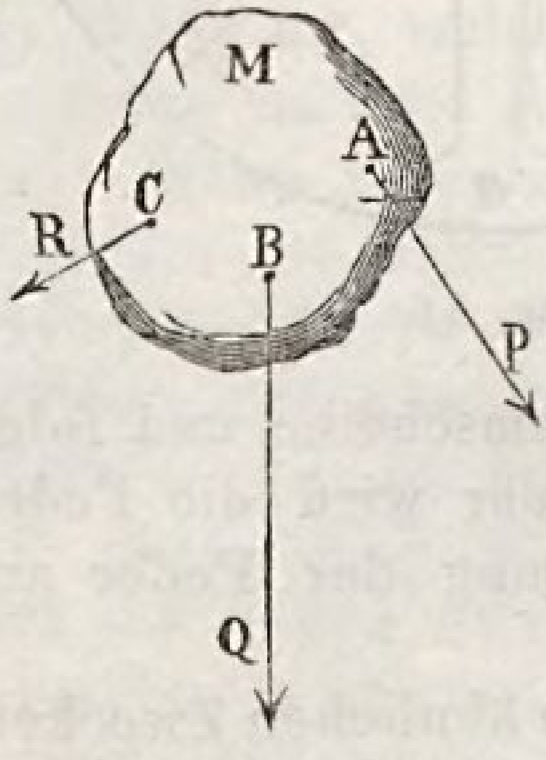


Fig. 17.

Sinn, in welchem eine Kraft wirkt, genau festzustellen, versieht man gewöhnlich das Ende der geraden Linie, durch welche sie dargestellt wird, mit einer Pfeilspitze, wie es die Fig. 17 zeigt.

§. 25. **Princip der gleichen Wirkung und Gegenwirkung. Starre Körper.** — Die Wirkung einer Kraft auf einen Körper besteht zunächst darin, dass sie ihren Angriffspunkt in ihrer Richtung fortzuführen sucht. Erst in Folge des Zusammenhanges dieses Punktes mit dem ganzen Körper, welcher Zusammenhang von Molekül zu Molekül durch die oben besprochenen Molekularkräfte vermittelt wird, überträgt sich die Wirkung der Kraft auf den Körper, vorausgesetzt, dass jene Molekularkräfte stark genug sind, um die alleinige Fortbewegung des Angriffspunktes zu verhindern. Es ist nun zweierlei, worauf wir bei diesem Vorgange zunächst hier unsere Aufmerksamkeit zu richten haben.

Erstens findet diese Einwirkung des Angriffspunktes auf die ihm zunächst liegenden Moleküle, von diesen wieder auf die nächsten u. s. w. in genau gegenseitiger Weise statt. Wenn zwei Moleküle A und B (Fig. 18) durch äussere Einflüsse von einander zu entfernen gesucht werden, so sind die attraktiven Molekularkräfte



Fig. 18.

welche zwischen ihnen auftreten (§. 19) von der Art, dass die Kraft P, mit welcher B das Molekül A zurückzuhalten sucht, genau gleich ist der Kraft Q, mit welcher A das Molekül B anzieht. Ganz ähnlich ist dies mit den repulsiven Kräften bei einem Versuch, die Moleküle einander zu nähern. Man drückt dies gewöhnlich so aus, dass man sagt, Wirkung und Gegenwirkung zwischen den Molekülen eines Körpers sind einander gleich. Dieser Satz, welcher sich in der Erfahrung überall bestätigt, ist von grosser Wichtigkeit, die noch dadurch erhöht wird, dass er sich auch auf die gegenseitige Wirkung zweier Körper aufeinander ausdehnen lässt. Zwei Körper, welche gegeneinander drücken oder aneinander ziehen oder sich stossen, üben in den Berührungspunkten Wirkungen auf einander aus, die von genau gleicher Grösse aber gerade entgegengesetzter Richtung sind. Mit der gleichen Kraft, mit welcher der eine in jedem der Berührungspunkte den andern drückt, wird er von diesem in entgegengesetzter Richtung wieder gedrückt. Die Wirkung, welche ein Körper auf einen anderen in den einzelnen Berührungspunkten oder auf grössere Entfernungen hin (Anziehung zwischen der Sonne und den Planeten z. B.) ausübt, ist genau gleich der Gegenwirkung,

welche er von diesem empfängt. Man nennt diesen Satz das Princip der gleichen Wirkung und Gegenwirkung; es wurde zuerst von *Newton* (1642—1727) in klarer und bestimmter Weise aufgestellt.

Das Zweite, worauf wir aufmerksam machen müssen, ist, dass mit jener Uebertragung der Wirkung einer Kraft vom Angriffspunkt aus auf den ganzen Körper eine Formänderung des letzteren nothwendig verbunden ist. Die Moleküle müssen ihre Lage gegeneinander ändern, wenn die Molekularkräfte auftreten sollen. Wenn die Kraft hierauf fortwährend dieselbe Grösse behält, so bleibt nun auch von einem gewissen Augenblick an die Form des Körpers unverändert, und er verhält sich jetzt genau so, wie ein sogenannter starrer Körper, dessen Moleküle in absolut unveränderlicher Lage gegeneinander verharren. Die in der praktischen Mechanik angewandten festen Körper sind immer von der Art, dass die Gestaltsveränderungen, welche sie unter dem Einflusse der an ihnen thätigen Kräfte erfahren, nur sehr klein sind, so klein, dass man sie fast immer vernachlässigen und die Körper von vornherein als starr betrachten kann. Dies werden wir denn in der Folge zunächst auch immer thun.

Hieraus folgt nun im Zusammenhalt mit dem, was wir oben in Bezug auf die Fortpflanzung der Wirkung einer Kraft in den Körpern gesagt haben, dass der Angriffspunkt einer Kraft in ihrer eigenen Richtung an jede beliebige Stelle des Körpers verlegt werden kann, ohne ihre Wirkung im Mindesten zu ändern. In der That ist es in der Wirkung offenbar völlig einerlei, ob Jemand an einem Schlitten vorn zieht oder hinten mit derselben Kraft schiebt, wenn nur die Angriffspunkte beidesmal in der Richtung liegen, in welcher der Zug und Druck erfolgt.

Wir hatten in dem gegenwärtigen §. nur feste Körper im Auge, und diese sind es auch, die wir in der ersten Abtheilung dieses Buches besonders zu beachten haben. Für die flüssigen und luftförmigen Körper macht sich wegen des eigenthümlichen losen Zusammenhangs zwischen ihren Theilchen eine besondere Behandlung in Bezug auf die auf sie einwirkenden Kräfte erforderlich. Ihnen ist desshalb die zweite Abtheilung gewidmet.

§. 26. **Arbeit der Kräfte.** — Wenn eine Kraft auf einen Körper, den wir nach oben als starr ansehen, einwirkt, so wird sie ihn entweder fortbewegen, oder die Hindernisse, welche den Körper zurückhalten, sind zu gross, als dass eine Bewegung desselben eintreten könnte. In letzterem Falle sagt man, die Wirkung der Kraft sei aufgehoben worden. Dies ist z. B. der Fall bei

Trägern oder Säulen, die eine darüber ruhende Last tragen, bei Pferden, welche an einem Wagen ziehen, aber zu schwach sind, um ihn vorwärts bewegen zu können u. dgl.

Erst dann, wenn die Kraft den Körper, auf welchen sie wirkt, oder wenigstens einen Theil desselben in ihrer Richtung fortbewegt, sagt man, diese ihre Wirkung sei von Erfolg gewesen, oder die Kraft habe eine Arbeit geleistet. Wenn schwere Körper, wie Steine oder Wasser, in die Höhe gehoben werden, wenn, wie beim Schmieden des Eisens, die gegenseitige Lage der Moleküle eines festen Körpers verändert wird, oder wenn diese Moleküle gänzlich von einander getrennt werden, wie beim Hobeln des Holzes oder Eisens, beim Mahlen des Getreides u. s. w., dann hat die angewendete Kraft gearbeitet. Der Begriff der mechanischen Arbeit (im Gegensatz zu der geistigen, die hier natürlich nicht in Betracht kommen kann) setzt also ebensowohl einen, durch eine Kraft überwundenen Widerstand, als eine hervorgebrachte Bewegung, einen Weg voraus, der in Folge jener Kraft zurückgelegt wurde.

§. 27. In dem einfachen Fall, wo eine nach Richtung und Stärke constante Kraft ihren Angriffspunkt in ihrer eigenen Richtung fortbewegt, ist es sehr leicht einzusehen, dass die Arbeit, welche die Kraft leistet, 1) der Grösse der Kraft und 2) der Länge des durchlaufenen Weges und daher dem Product aus beiden proportional ist. Schon die Vorstellung, welche man im gewöhnlichen Leben mit dem Begriffe der Grösse einer Arbeit verbindet, nach welcher man sich bei der Höhe des Lohnes, den man dafür bezahlt, richtet, entspricht jener genaueren Bestimmung. Wenn zwei Arbeiter damit beschäftigt sind, Sand von einer Fläche auf eine höher gelegene zu schaufeln, und es nimmt der eine stets das doppelte Quantum auf seine Schaufel, wendet also die doppelte Kraft als der andere an, so ist die von ihm geleistete Arbeit in derselben Zeit doppelt so gross, als die des anderen. Ebenso, wenn der eine dieser Arbeiter dieselbe Quantität Sand zwei Meter hoch fördert, der andere aber nur einen Meter hoch, so hat ersterer wiederum die doppelte Arbeit geleistet. Und wenn die Menge des gehobenen Sandes sowohl, als die Höhe, auf welche er gefördert wird, bei dem einen Arbeiter doppelt so gross ist als bei dem andern, so ist die Arbeit des ersteren viermal so gross als die des letzteren.

Das Product also, welches man erhält, wenn man die Grösse der Kraft mit der Länge des in ihrer Richtung durchlaufenen Weges multiplicirt, gibt ein Maass für die Grösse der geleisteten

Arbeit. Nun drücken wir die Kräfte in Gewichtseinheiten, Kilogrammen oder Pfunden, die Wege in Längeneinheiten, Metern oder Fussen, aus. Die Einheit also, in welcher die Arbeit gemessen wird, muss aus beiden zusammengesetzt sein. Sie heisst daher auch im metrischen Systeme Kilogrammmeter, in anderen Fusspfund. Um also einen 8 Kilogramm (8^k) schweren Körper 3 Meter (3^m) hoch zu heben, ist eine Arbeit von 24 Kilogrammmetern (abgekürzt 24^{km}) erforderlich. Wenn ein Pferd mit einer Kraft von 60 Pfund einen Wagen 100 Fuss weit bewegt, so hat es eine Arbeit von 6000 Fusspfund (abgekürzt 6000 Fpfd.) geleistet.

Die Arbeitseinheit Fusspfund ist natürlich, wie der Fuss und das Pfund, in verschiedenen Ländern verschieden. Die Vergleichung der verschiedenen Fusspfunde unter sich und mit dem Kilogrammmeter könnte schon den Tabellen I und IV am Schlusse dieses Buches entnommen werden. Die Tabelle VI gibt diese Vergleichung direct.

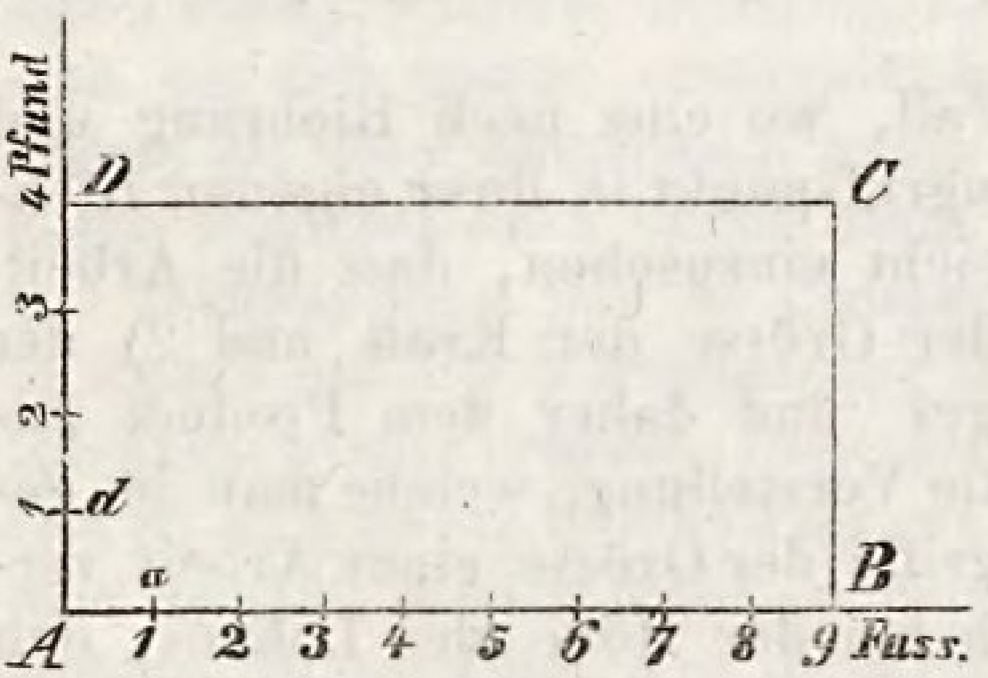


Fig. 19.

§. 28. Wenn man den durchlaufenen Weg als die Grundlinie AB (Fig. 19) eines Rechteckes ABCD und die dabei aufgewendete Kraft als die Höhe AD desselben betrachtet, indem man ein willkürliches Stückchen A*a* der Basis als Längeneinheit, z. B. Fuss, und ein ebenfalls willkürliches Stückchen A*d* der Höhe als Krafteinheit, z. B. Pfund, nimmt, so stellt der Flächeninhalt des Rechtecks die geleistete Arbeit in derjenigen Einheit vor, welche aus jenen beiden zusammengesetzt ist. Im Falle unserer Figur ist diese Arbeit $4 \times 9 = 36$ Fpfd.

§. 29. Diese letztere Bemerkung verhilft uns nun auf ebenso einfache als praktische Weise dazu, die Arbeit einer nach ihrer Grösse veränderlichen Kraft zu finden. Setzen wir immer noch voraus, dass die Richtung der Kraft constant bleibe, dass sie also in dieser ihrer Richtung den Körper in gerader Linie fortbewege, so können wir uns den Weg desselben, unter Zugrundlegung einer willkürlichen Einheit, wie oben längs einer geraden Linie AM (Fig 20) von einem willkürlichen Anfangspunkt A aus aufgetragen denken, sodass diese Linie selbst in gleichem oder verkleinertem Maassstab den Weg des Körpers, bei A anfangend, vorstellt. Trägt man nun an irgend einer Stelle B dieses Weges

die Grösse, welche die Kraft in dem Augenblick besitzt, wo sich der Körper an dieser Stelle befindet, in irgend einer willkürlichen Einheit unter einem rechten Winkel zu AM auf, als Bb z. B., und verfährt so in allen übrigen Punkten des Weges, so erhält man eine krumme Linie $abdc$, welche die Veränderungen in der Grösse der Kraft deutlich erkennen lässt.

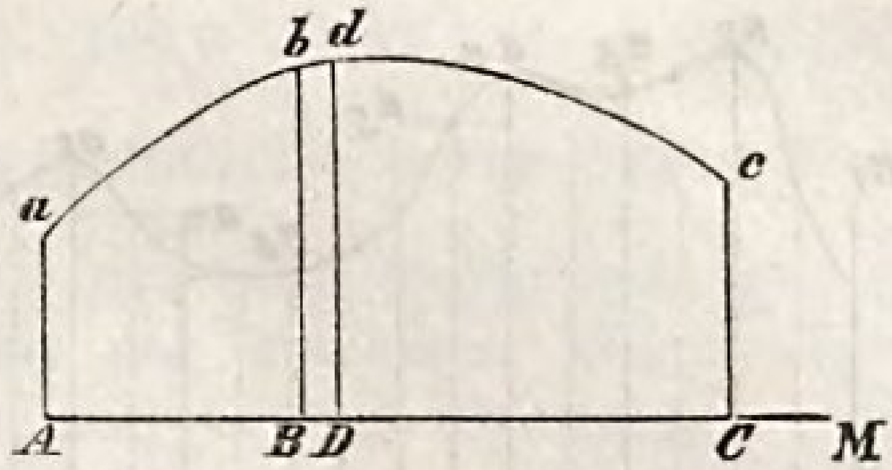


Fig 20.

Wenn man sich nun ein kleines Wegstückchen BD denkt und in den Endpunkten desselben die Höhen Bb, Dd, welche die Grösse der Kraft vorstellen, so wird man dieses Wegstückchen immer so klein annehmen können, dass man das Stückchen bd der Curve oben nicht blos als gerade, sondern auch als parallel zu BD, das Viereckchen BDdb also als Rechteck betrachten darf. Die Fläche dieses Rechteckchens stellt dann offenbar die während des Weges BD von der Kraft geleistete Arbeit vor. Wenn man auf gleiche Weise den ganzen, von A bis C durchlaufenen Weg in solche kleine Wegstückchen zerlegt, so gelangt man leicht zu dem Schluss, dass der Flächeninhalt der von den drei geraden Linien Aa, AC und Cc und von der krummen Linie $abdc$ begrenzten Figur die Arbeit vorstellt, welche von der veränderlichen Kraft auf dem Wege AC geleistet wurde. Ist dieser Inhalt durch die Zahl 24 z. B. ausgedrückt, während der Weg längs AC in Metern, die Höhen Aa, Bb, Cc in Kilogrammen aufgetragen sind, so ist die geleistete Arbeit 24^{km}.

§. 30. Um also die Arbeit einer veränderlichen Kraft zu finden, ist es nöthig, den Inhalt einer solchen Fläche wie ACca in Fig. 20 oder $A_1 A_{11} a_{11} a_1$ in Fig. 21 ausmitteln zu können. In dem Falle, wo zwischen der Grösse der Kraft und der Länge des durchlaufenen Weges eine gesetzmässige und bekannte Abhängigkeit besteht, ist dies durch Rechnung, aber meist nur auf Wegen der höheren Mathematik möglich. Da aber diese in unserem Buche nicht vorausgesetzt werden soll, da überdies die dabei vorausgesetzte Gesetzmässigkeit in der Praxis nur in seltenen Fällen vorhanden ist, so beschränken wir uns auf die Angabe folgender dreier Verfahren und bemerken, dass dies gerade diejenigen sind, welche in der Praxis fast stets angewandt werden.

1) Man theilt die Basis $A_1 A_{11}$ der zu suchenden Fläche in eine gewisse Anzahl gleicher Theile $A_1 A_2$, $A_2 A_3$ u. s. w. und er-

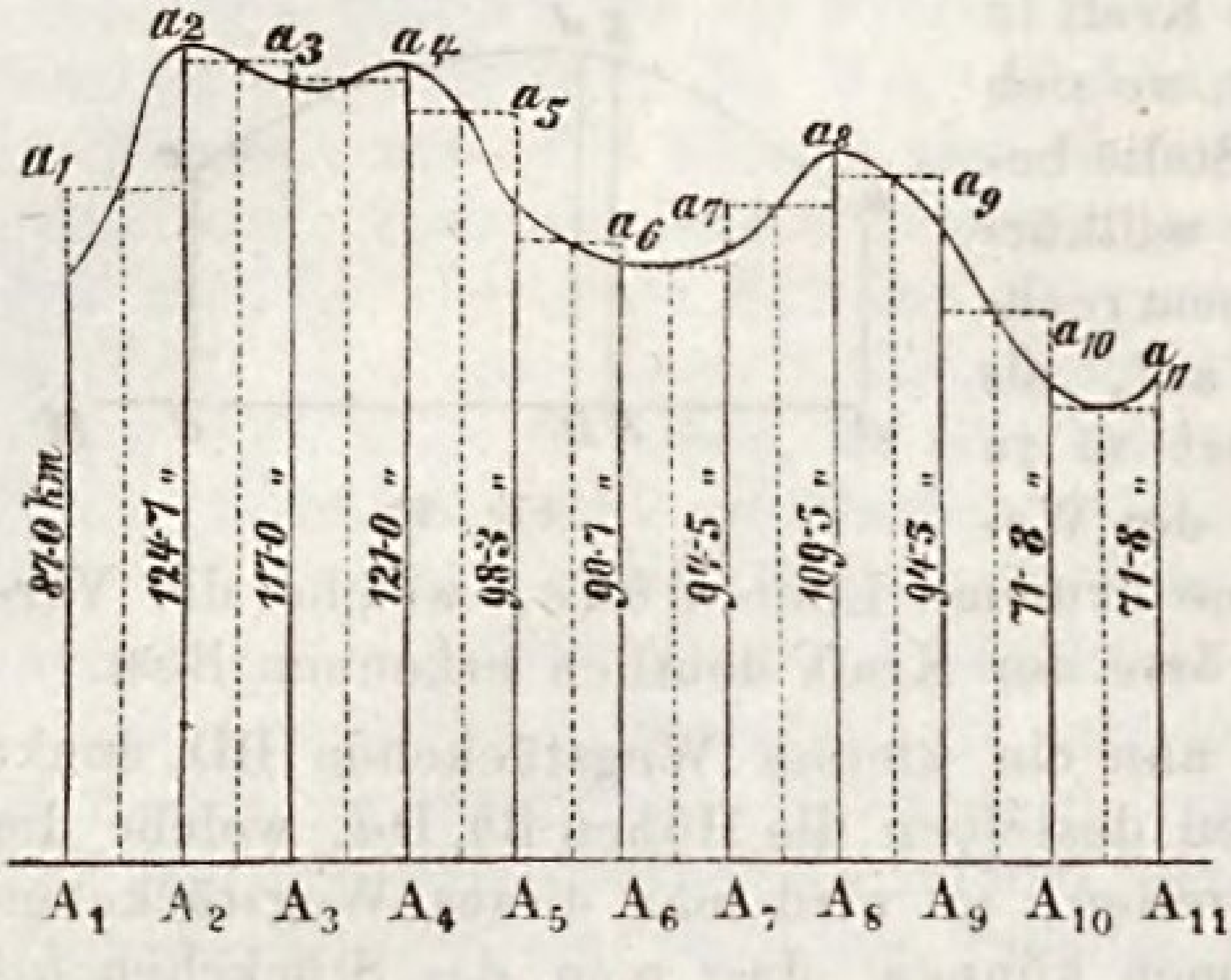


Fig. 21.

richtet in den Theilungspunkten die Höhen $A_1 a_1$, $A_2 a_2$ etc. Die Anzahl dieser Theile wird um so grösser sein müssen, je rascher zwischen den Enden a_1, a_2, a_3 etc. der Höhen die Curve ihren Lauf ändert. Für gewöhnlich wählt man die Zahl 10 und reicht in der Praxis meist damit aus. Man bestimmt dann die Flächeninhalte der einzelnen Figuren $A_1 A_2 a_2 a_1$, $A_2 A_3 a_3 a_2$ etc., indem man sie als Rechtecke betrachtet, deren Grundlinie je der 10. Theil der Gesammtlänge des Weges, und deren Höhe die je in der Mitte der Grundlinie aufstehende, in der Figur punktirt gezeichnete ist. Das Product aus Grundlinie und dieser mittleren Höhe ist die Fläche eines solchen Rechtecks, und die Summe aller dieser Producte gibt den gesuchten Flächeninhalt der Figur (strenggenommen allerdings nur den der Summe der in der Figur angedeuteten Rechtecke, welcher aber in der Praxis meistens genau genug als der Flächeninhalt dieser Figur genommen werden kann). Da jene Rechtecke sämmtlich gleiche Grundlinien haben, so erhält man die Summe ihrer Flächen auch, wenn man die Summe der Höhen mit dem 10. Theil des Weges $A_1 A_{11}$, oder wenn man den 10. Theil jener Summe mit dem ganzen Weg AB multiplicirt. Der 10. Theil der Summe der Höhen ist nichts anderes, als das Mittel derselben. Man hat also die einfache Regel: Multiplicire das Mittel aus den in der Mittellinie der Rechtecke gemessenen Höhen, oder das Mittel der veränderlichen Kraft mit dem durchlaufenen Weg.

In dem Beispiele unserer Figur ist der Weg $A_1 A_{11}$ gleich 40 Meter. Die in den Punkten A_1, A_2 etc. errichteten Höhen haben die eingeschriebene Grösse. Um die in der Mittellinie der Rechtecke gemessenen punktirten zu erhalten, kann man sie direct messen oder, wie hier geschehen soll, das Mittel aus den Höhen am Anfang und Ende des betreffenden Rechtecks nehmen. Die durch Fig. 21 repräsentirte Arbeit ist also gleich

$$\frac{1}{10} \times (105{,}8 + 120{,}8 + 119{,}0 + 109{,}6 + 94{,}5 + 92{,}6 + 102{,}0$$
$$+ 102{,}0 + 83{,}1 + 71{,}8) \times 40 = 100{,}12 \times 40 = 4004{,}8^{\text{km}}.$$

Wenn der Verlauf der Curve ein sehr unregelmässiger ist, so thut man gut, die Gleichheit der einzelnen Wegtheilchen $A_1 A_2$, $A_2 A_3$ etc. ganz aufzugeben und sie nur überhaupt so einzurichten, dass zwischen den Endpunkten a_1, a_2, a_3 etc. der Höhen die Curve nahezu als gerade Linie betrachtet werden kann. Die Rechtecke müssen dann natürlich einzeln ausgerechnet und addirt werden.

2) Die oben aufgestellte Regel ist die am meisten angewandte. Aber wenn die Curve ihre Concavität durchweg nach der Basis $A_1 A_{11}$ kehrt, so gibt sie ein etwas zu grosses Resultat, ein wenig zu kleines dagegen, wenn jene durchweg ihre Convexität der Basis zuwendet. Bei abwechselnd concaven und convexen Curven compensirt sich dies zum Theil. Genauere Resultate aber gibt in jedem Fall die sog. Simpson'sche Regel. Diese sagt: Nachdem man die Basis $A_1 A_{11}$ (Fig. 21) der Fläche in eine gerade Anzahl gleicher Theile getheilt hat, ziehe man in allen Theilungspunkten sowohl, als am Anfangs- und Endpunkt die Höhen und bezeichne sie, von der ersten anfangend, mit 1, 2, 3 etc. Hierauf addire man zur Summe der ersten und letzten Höhe die vierfache Summe aller geraden und die doppelte aller ungeraden Höhen (mit Ausnahme der ersten und letzten) und multiplicire das Ganze mit dem dritten Theil des Abstandes zweier Höhen. Für unser obiges Beispiel in Fig. 21 stellt sich also die Rechnung so:

$A_1 a_1 = 87{,}0^{k}$	$A_2 a_2 = 124{,}7$	$A_3 a_3 = 117{,}0$
$A_{11} a_{11} = 71{,}8$	$A_4 a_4 = 121{,}0$	$A_5 a_5 = 98{,}3$
158,8	$A_6 a_6 = 90{,}7$	$A_7 a_7 = 94{,}5$
	$A_8 a_8 = 109{,}5$	$A_9 a_9 = 94{,}5$
	$A_{10} a_{10} = 71{,}8$	$404{,}3 \times 2$
	$517{,}7 \times 4$	808,6
	2070,8	

$$\frac{1}{3} \times 4\ (158{,}8 + 2070{,}8 + 808{,}6) = 4050{,}9^{\text{km}}.$$

3) Endlich kann man sich zur Ausmittelung der in Rede stehenden Flächen noch eines **Planimeters** bedienen. So nennt man im Allgemeinen jene mathematischen Instrumente, welche durch Umfahren des Umfanges einer Figur deren Flächeninhalt

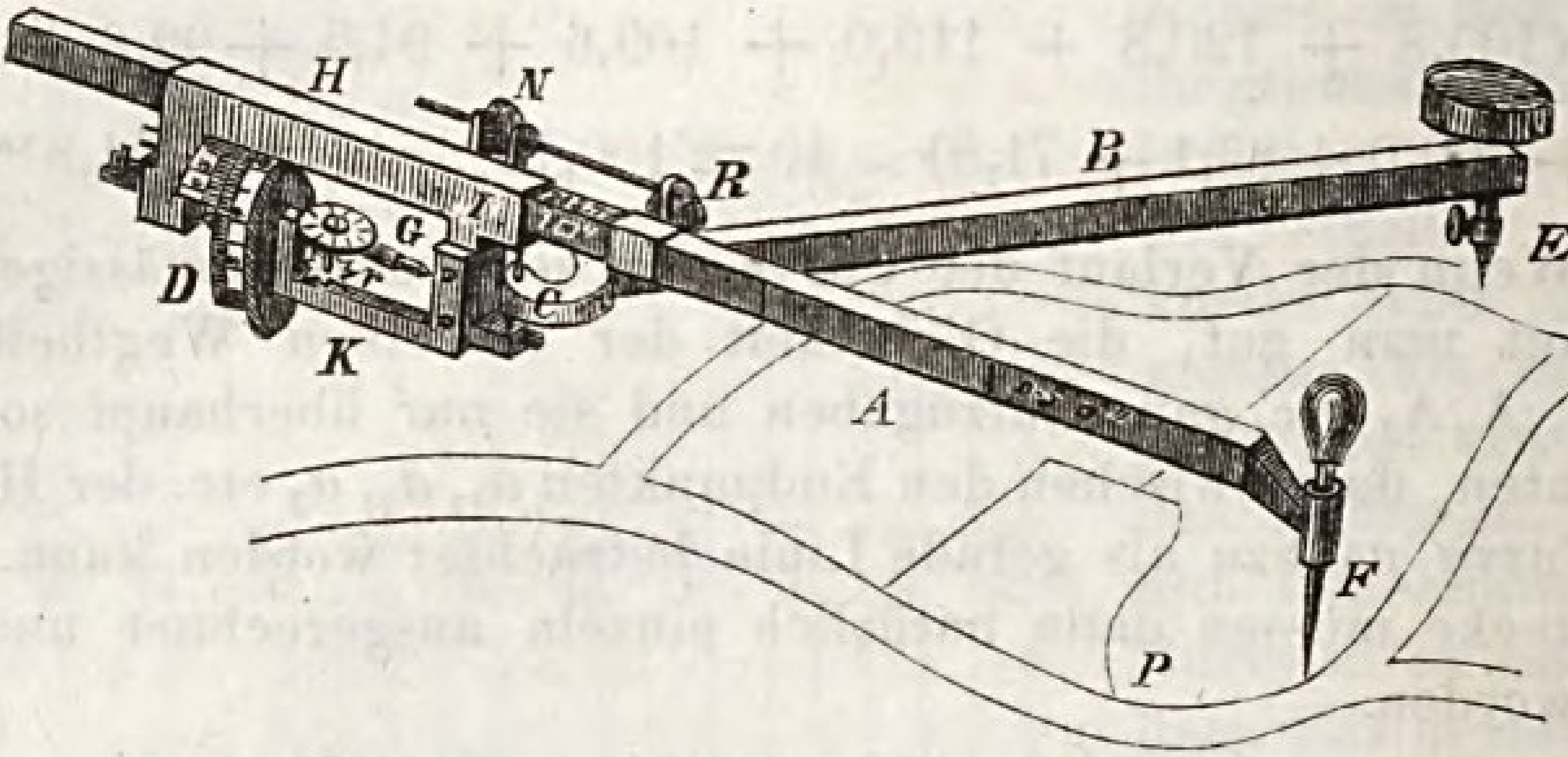


Fig. 22.

finden lassen. Es gibt verschiedene Arten solcher Planimeter. Wir begnügen uns, hier einen der einfachsten, den Amsler'schen Polarplanimeter, der besonders zu dem hier in Rede stehenden Zweck zu empfehlen ist, näher zu beschreiben. Der in Fig. 22 in ungefähr $^1/_3$ der natürlichen Grösse abgebildete ist für bayer. Decimalmaass getheilt. Er besteht aus einem Rahmen HK, mit dem zwei Arme A und B verbunden sind. Der eine derselben, A, wird zunächst in seiner Hülse H so weit verschoben, bis ein mit 1 □″ bezeichneter Strich desselben mit der vordersten Kante I der Hülse zusammenfällt, und dann mit der Klemmschraube R festgestellt. Hiebei gestattet die Mikrometerschraube N die feinere Einstellung. Der andere Arm B von unveränderlicher Länge ist um die Spitzen C sehr leicht drehbar. In demselben Rahmen HK ist ferner die, gleichfalls sehr leicht in Spitzen drehbare Achse eines Rädchens D angebracht, dessen Umfang direct in 100 Theile getheilt ist. Der Nonius daneben gestattet eine nochmalige Theilung mit 10. Bei jeder ganzen Umdrehung des Rädchens wird mittelst einer Schraube ohne Ende ein Zahnrädchen r mit 10 Zähnen um einen Zahn und daher die darüber liegende Scheibe G, welche in 10 Theile getheilt ist, um einen solchen Theil gedreht, was an einer daneben angebrachten Marke ersichtlich ist. Die letztere Vorrichtung hat lediglich den Zweck, die Anzahl der Umdrehungen des Rädchens bis zu 10 anzugeben. Das ganze Instrument ruht in drei Punkten, nämlich mit den Spitzen F und E an den Enden der Arme A und B und mit einem Punkt der Peripherie des Rädchens D, auf der Fläche des Papiers, auf das die zu messende Figur gezeichnet ist, auf. Die Spitze E bleibt unverändert an ihrem Ort, der am besten, wo möglich, irgendwo ausserhalb der Figur genommen wird. Zur Sicherung dieser Unveränderlichkeit ist sie mit einem Gewicht-

chen beschwert. Mit der Spitze F wird der Umfang der Figur umfahren; währenddem wälzt sich das Rädchen in bestimmter Weise auf dem Papier fort. Aus der Zahl der ganzen und den Bruchtheilen der Umdrehungen, die es gemacht hat, ergibt sich der Inhalt der umfahrenen Figur sehr einfach: bei dem vorliegenden Instrument gilt jede Zehntelsumdrehung einen Quadratzoll. Um daher den Flächeninhalt einer Figur, wie die 21. z. B., zu finden, setzt man den Planimeter so auf das glatt und eben ausgespannte Papier, das die Figur enthält, dass die Spitze E womöglich ausserhalb der letzteren und die Spitze F auf irgend einen Punkt des Umfangs derselben, z. B. auf A_1, zu liegen kommt. Alsdann notirt man sich den Stand des Rädchens in der Weise, dass man sich die kleinere von den zwei Ziffern des Scheibchens G, zwischen welchen die daneben befindliche Marke steht, als erste Ziffer hinschreibt. Rechts daneben diejenigen zwei, welche den kleineren derjenigen beiden Hunderttheile des Rädchenumfangs geben, zwischen welchen sich eben der Nullpunkt des Nonius befindet; und als vierte und letzte Ziffer rechts endlich die Ablesung des Nonius selbst. So ergab sich in dem oben schon gewählten Beispiel der Fig. 21 die Zahl 5006. Von dieser sind die zwei letzten Ziffern rechts durch ein Komma, wie für die Ganzen und Bruchtheile eines Decimalbruchs gebräuchlich, zu trennen: 50,06. Hierauf umfährt man in beliebiger Richtung mit der Spitze F den Umfang der Figur, bis man wieder zum Ausgangspunkt zurückgekehrt ist, und notirt sich dann wiederum den Stand des Rädchens in obiger Weise. Wir erhielten bei unserem Beispiel: 48,24. Man zieht nun die kleinere von den beiden erhaltenen Zahlen von der grösseren ab. Die Differenz gibt den Inhalt der Figur in Quadratzollen: in unserem Beispiel 1,82 Quadratzoll.

Die erhaltene Zahl ist für den speciellen Zweck, zu welchem wir den Planimeter hier verwenden, noch zu reduciren: wir müssen Fusspfund oder Kilogrammmeter erhalten. Die Reductionszahl ist aber leicht zu finden. Knüpfen wir sogleich an das obige Beispiel an, so ergibt eine leichte Messung mittelst eines guten Maassstabes, dass dortselbst jeder Zoll der Basis $A_1 A_{11}$ 23,1 Meter und jeder Zoll der Höhen 96,0 Kilogramme vorstellt. Jeder Quadratzoll der Fläche entspricht demnach 2217,6 Kilogrammmetern und daher die oben gefundenen 1,82 Quadratzoll = $2217{,}6 \times 1{,}82 = 4036{,}0$ Kilogrammmetern.

Wir haben diesem nur noch einige Bemerkungen zuzufügen. Dass man darauf Acht haben muss, wann die Ziffer 0 des Scheib-

chens G an der Marke vorübergeht, um es in selbstverständlicher Weise bei den Notirungen zu berücksichtigen, ist für sich klar. — Wenn der Arm A in seiner Hülse so weit zurückgeschoben wird, bis der mit 0,5 □″ bezeichnete Strich auf ihm mit dem Rande I zusammenfällt, so beträgt der Werth einer Zehntelsumdrehung des Rädchens nur noch einen halben Quadratzoll. In diesem Fall gibt das Instrument kleinere Flächen genauer. — Wenn die zu messende Figur so gross ist, dass die Spitze E nicht ausserhalb ihres Umfangs angebracht werden kann, so hat man zu dem auf obige Weise erhaltenen Resultat eine constante Zahl zu addiren. Diese ist über dem, auf dem Arm A befindlichen und auf die Kante I einzustellenden Strich auf dem Instrument selbst bemerkt. Bei dem in Fig. 22 abgebildeten Instrument heisst sie 208,77 für den mit 1 □″ bezeichneten Strich des Armes A.

Es ist hier nicht der Ort, auf die Theorie des Instrumentes näher einzugehen; es möge genügen, seine Einrichtung und seinen Gebrauch beschrieben zu haben.

§. 31. **Registrirende Dynamometer.** — Die in §. 29 behandelte graphische Darstellung der verschiedenen Grössen einer Kraft ist desshalb von so grosser praktischer Wichtigkeit, weil die dabei sich ergebenden krummen Linien, welche die Veränderlichkeit der Kraft vorstellen, von den besseren Dynamometern selbst aufgezeichnet werden. Man nennt solche Dynamometer registrirende, und es ist sehr leicht, das Princip, auf welchem diese sämmtlich beruhen, deutlich zu machen. Zu diesem Behufe denke man sich mit der Feder, welche, wie gewöhnlich, den Hauptbestandtheil des Dynamometers ausmacht (§. 23), einen Schreibstift so verbunden, dass er an der Bewegung der Feder bei ihrer Spannung sowohl als Abspannung Theil nimmt. Senkrecht zu dieser Bewegung des Schreibstiftes wird ein Streifen Papier so vor demselben vorbeibewegt, dass seine Bewegung proportional derjenigen des Körpers ist, welcher durch die zu messende Kraft fortbewegt wird. Auf diese Weise beschreibt der Schreibstift eine Curve, wie z. B. die *ac* (Fig. 20) auf dem Papier. Zu gleicher Zeit wird durch einen zweiten Schreibstift (oder auch durch den nämlichen vor oder nach der vorzunehmenden Messung) die Grundlinie AC (Fig. 20) der Figur beschrieben, und zwar bei ungespannter Feder, also bei der Kraft Null. Diese Linie stellt zugleich den Weg des Körpers in verkleinertem, vergrössertem oder gleichem Maassstabe vor. Die senkrechten Entfernungen der einzelnen Curvenpunkte von ihr

geben die Grösse der Kraft zu einer Zeit, wo das Bewegte sich an den Stellen des Weges befand, welche durch die Fusspunkte der von jenen Punkten auf die Grundlinie gefällten Höhen bestimmt sind.

Eine solche Registrirvorrichtung ist z. B. an den *Poncelet*'schen Zugdynamometern von *Morin* angebracht; die Fig. 21, welche im vorigen §. wiederholt berechnet wurde, ist wirklich mittelst dieses Dynamometers erhalten worden, und zwar stellen ihre Höhen die sich ändernde Zugkraft der Pferde vor, welche ein Postschiff auf dem Kanal de l'Ourcq zogen. Der in §. 23 schon erwähnte Dampfmaschinen-Indicator, die von *Morin* verbesserte dynamometrische Kurbel und der Rotationsdynamometer von demselben sind gleichfalls mit Registrirapparaten versehen.

§. 32. **Totalisirende Dynamometer.** — Es gibt endlich auch noch solche Dynamometer, welche die Multiplication von Kraft und Weg, oder die Berechnung des Flächeninhalts der im §. 29 behandelten Figuren sogleich selbst besorgen. Sie werden totalisirende Dynamometer genannt und beruhen auf ganz ähnlichen Principien wie die Planimeter. Nach dem, was wir im §. 30 über das Amsler'sche Planimeter gesagt haben, kann es nicht mehr schwer sein, sich über diese Principien Rechenschaft zu geben. Weiter auf diese Instrumente einzugehen, können wir hier schon desswegen unterlassen, weil sie ihrer grossen Complicirtheit und der zarten Behandlung halber, welche sie erfordern, in der Praxis nur selten angewendet werden.

§. 33. **Mittlere Grösse einer Kraft.** — Man kann sich die Arbeit, welche eine veränderliche Kraft leistet, indem sie eine gewisse Wegstrecke hindurch auf einen Körper einwirkt, auch durch eine constante Kraft hervorgebracht denken, welche jenen Körper denselben Weg hindurch bewegt. Die Grösse dieser constanten Kraft heisst dann die mittlere Grösse jener veränderlichen Kraft. Man erhält sie offenbar, wenn man die gesammte geleistete Arbeit durch den Weg dividirt. In dem im §. 30 behandelten Beispiel war nach der dritten Berechnung die geleistete Arbeit 4036,0 Kilogrammmeter, der Weg betrug 40 Meter. Die von den Pferden ausgeübte mittlere Kraft war daher $\frac{4036{,}0}{40} = 100{,}9$ Kilogramm. Man sieht, die hier gegebene Erklärung von mittlerer Kraft fällt nicht ganz mit derjenigen zusammen, welche wir im §. 30 bei Gelegenheit der dort behandelten ersten Berechnungsart gegeben haben; der im gegenwärtigen §. zur Ausmittlung der mittleren Kraft gelehrte Weg ist der

genauere; doch gibt der andere immerhin auch solche Resultate, dass sie für die Praxis in den meisten Fällen genau genug sind.

Aus dem Vorhergehenden folgt noch, dass wenn die Arbeit der veränderlichen Kraft durch die Fläche A*abgcdef*M (Fig. 23) repräsentirt ist, die Arbeit der constanten mittleren Kraft durch die Fläche des Rechteckes AA'M'M, welches dieselbe Grösse wie jene Fläche hat, vorgestellt werden muss. Die Höhe dieses Rechtecks ist natürlich gleich der mittleren Kraft. Dabei mag es nicht überflüssig sein, zu bemerken, dass die Punkte

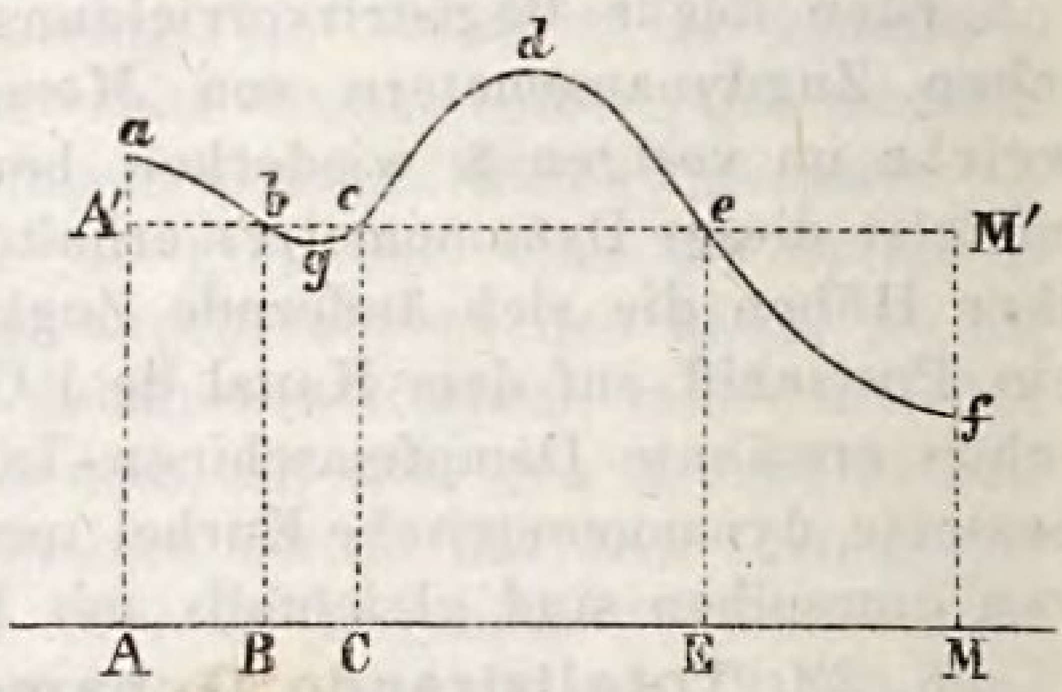


Fig. 23.

b, *c*, *e*, wo die Curve der veränderlichen Kraft die Linie A'M' der mittleren Kraft schneidet, denjenigen Lagen des Bewegten entsprechen, wo die veränderliche Kraft den Werth der mittleren annimmt. Ferner stellen offenbar die Flächen A'*ab*, *cde* über der Geraden A'M' den Ueberschuss der von der veränderlichen Kraft geleisteten Arbeit über diejenige der mittleren Kraft vor, während die Strecken AB, CE durchlaufen werden; die unterhalb A'M' gelegenen Flächenstücke *bgc*, *ef*M' dagegen bedeuten den Ueberschuss der Arbeit der mittleren Kraft über die der veränderlichen während der Wegstrecken BC, EM. Die Summe aller ersten Ueberschüsse muss offenbar gleich sein der Summe der zweiten.

§. 34. **Pferdekraft.** — Wir haben bisher die Zeit, in welcher eine bestimmte Arbeit geleistet wird, ganz unberücksichtigt gelassen, und in der That ist es für die Grösse einer Arbeit ganz gleichgiltig, in welcher Zeit sie ausgeführt wird. Wenn man aber die Leistungsfähigkeit einer Kraftmaschine, eines Wasserrades oder einer Dampfmaschine z. B., oder irgend eines andern Motors in Bezug auf die Menge der Arbeit, welche von demselben ausgeführt werden soll, beurtheilen will, so reicht es nicht aus, nach der Arbeit überhaupt zu fragen, welche dieselben leisten können. Diese Arbeit kann ja jede beliebige Grösse erreichen, wenn man nur eine gehörig grosse Zeit dazu gestattet. Es kommt also in diesem Falle auf diejenige Menge Arbeit an, welche in einer bestimmten Zeit geleistet wird, und als solche Zeit hat man die Secunde oder Minute genommen. Man wird also stets fragen, wie gross die Arbeit ist, welche eine Maschine in einer

Secunde oder Minute leisten kann. Um hiebei aber auch zugleich kleinere Zahlen zu erhalten, ist man übereingekommen, eine grössere Einheit zu Grunde zu legen, und hat desshalb eine Arbeit von einer gewissen Anzahl Kilogrammmetern oder Fusspfunden eine Pferdekraft genannt. Die Grösse dieser neuen Einheit hängt also ab von der Zeiteinheit sowohl, als von der Arbeitseinheit, welch' letztere selbst wieder von der Gewichts- und Längeneinheit bedingt wird. In Frankreich ist die Grösse einer Pferdekraft auf 75 ^{km} in der Secunde, in England auf 33000 Fpfd., geleistet in der Minute, oder 550 Fpfd. in der Secunde, festgesetzt. In den deutschen Staaten legte man meist die französische Einheit für die Pferdekraft zu Grunde, indem man dieselbe in die Landesmaasse reducirte. In manchen dieser Staaten ist die so erhaltene Zahl abgerundet und gesetzlich festgestellt worden. So ergibt sich aus den Tabellen I und IV oder direct aus der Tab. VI am Schlusse, dass 75 ^{km} in Bayern 458,88 Fpfd. oder 513,946 Fuss-Zollpfund, in Preussen 477,93 Fpfd., in Oesterreich 423,67 Fpfd., in Württemberg 523,58 Fpfd., in Baden 500 Fpfd., in Hannover 513,53 Fpfd., in Sachsen 529,68 Fpfd. sind. In Bayern wurde durch Verordnung vom 9. Septbr. 1852 die Pferdekraft zu 514 Fuss-Zollpfund bayer., in Preussen durch Ministerialverfügung vom 14. Febr. 1858 zu 480 Fpfd. preuss., in Oesterreich durch eine Ministerialverfügung vom Jahre 1860 auf 430 Fpfd. österr., in Württemberg durch Ministerialverfügung vom 14. März 1859 auf 525 Fpfd. württemb., in Hannover auf 516 Fpfd. hannov. in der Secunde festgestellt. Folgende Tabelle gibt eine Vergleichung derjenigen Pferdekräfte, welche von der französischen (75 ^{km} in der Secunde) verschieden sind, unter sich und mit jener französischen.

Tab. 7. Vergleichung verschiedener Pferdekräfte.

Frankreich 75 $^{km.}$	England 550 Fpfd.	Bayern 514 F.-Zpfd.	Preussen 480 Fpfd.	Oesterreich 430 Fpfd.	Würtemberg 525 Fpfd.	Hannover 516 Fpfd.
1	0,9863	0,9999	0,9957	0,9853	0,9973	0,9952
1,0139	1	1,0138	1,0095	0,9989	1,0112	1,0090
1,0001	0,9864	1	0,9958	0,9854	0,9974	0,9953
1,0043	0,9906	1,0042	1	0,9895	1,0016	0,9995
1,0149	1,0011	1,0148	1,0106	1	1,0121	1,0101
1,0028	0,9890	1,0027	0,9985	0,9880	1	0,9980
1,0048	0,9911	1,0047	1,0005	0,9900	1,0020	1

In dem Beispiele, für welches die Fig. 21 gilt, wo, wie schon erwähnt, Pferde ein Schiff fortzogen, war die Geschwindigkeit, mit welcher sich das Schiff fortbewegte, 4,71 Meter in der Secunde. Zur Zurücklegung des Weges von 40^{m}, im Verlaufe dessen die Arbeit von $4036{,}0^{km}$ geleistet wurde, waren folglich $\frac{40}{4{,}71} = 8{,}49$ Secunden erforderlich. Auf 1 Secunde kommt also eine Arbeit von $\frac{4036{,}0}{8{,}49} = 475{,}4^{km}$, entsprechend $\frac{475{,}4}{75} = 6{,}4$ Pferdekräften. Mit Benützung der im §. 33 berechneten mittleren Kraft (100,9) hätte man auch sogleich die Leistung in der Secunde bestimmen können, indem man sie mit der Geschwindigkeit multiplicirt hätte: $4{,}71 \times 100{,}9 = 475{,}2^{km}$. — Wenn der mittlere wirksame Druck auf den Kolben einer Dampfmaschine, der 100 Quadratzoll Querschnitt hat, 50 Pfund pro Quadratzoll, im Ganzen also 5000 Pfund beträgt, und die (nach §. 14 berechnete) mittlere Geschwindigkeit des Kolbens $2^1/_2$ Fuss in der Secunde ist, so ist die Leistung des Dampfes in der Maschine in der Secunde $5000 \times 2^1/_2 = 12500$ Fusspfund, oder, englisches Maass vorausgesetzt, $\frac{12500}{550} = 22{,}7$ Pferdekräfte.

Bezeichnet allgemein v die mittlere Geschwindigkeit des bewegten Körpers per Secunde und p die aufgewendete mittlere Kraft oder den überwundenen mittleren Widerstand, so ist pv die Arbeit per Secunde und daher, mit N die Anzahl der Arbeitseinheiten per Secunde für eine Pferdekraft bezeichnet, $\frac{pv}{N}$ die Leistung in Pferdekräften.

Bedeutet Q den Querschnitt, h den Hub eines Dampfmaschinenkolbens und p den pro Quadratzoll wirksamen mittleren Druck auf denselben, so ist die bei einem Hub geleistete Arbeit $= pQh$, oder da $Qh = V$ das vom Kolben beschriebene Volumen (reines Volum des Cylinders genannt) ist, auch $= pV$. Für n Doppelhübe (Umdrehungen des Schwungrads) in der Minute ist daher die geleistete Arbeit $2npV$ oder in Pferdekräften: $\frac{2npV}{60N} = \frac{npV}{30N}$.

Die Arbeit, welche ein Pferd unter gewöhnlichen Umständen leisten kann, ist nicht so gross als diejenige, welche wir soeben mit dem Namen Pferdekraft bezeichnet haben. Sie beträgt nur $40—45^{km}$ in der Secunde. Der Werth einer Pferdekraft ist eine rein conventionelle Festsetzung und sogar in verschiedenen Ländern verschieden. Wenn man also sagt, eine Maschine habe z. B. 10 Pferdekräfte, so ist dies nicht streng so zu verstehen, dass die von ihr geleistete Arbeit auch von 10 Pferden ausgeführt werden könnte. Ausserdem ist zu bemerken, dass das Wort Pferdekraft eigentlich nicht richtig gewählt ist, weil es keine

Kraft, sondern eine gewisse Menge Arbeit bezeichnen soll. Man hat desshalb, um Irrungen vorzubeugen, in neuerer Zeit andere Bezeichnungen dafür vorgeschlagen, wie namentlich Dampfpferd, dynamisches Pferd u. s. f. Aber es scheint nicht, dass der ursprüngliche Name Pferdekraft von den Praktikern aufgegeben wird, und da es am Ende weniger Inconvenienzen hat, mit diesem Wort den richtigen Begriff zu verbinden, als ein neues an seine Stelle zu setzen, so haben wir die ältere Bezeichnungsweise beibehalten.

§. 35. **Fall, wo das Bewegte eine krumme Linie beschreibt.** — Wir haben bisher immer stillschweigend vorausgesetzt, dass der Weg, welchen der Körper in Folge der arbeitenden Kraft zurücklegt, gerade sei. Es ist dies jedoch für die Bestimmung der Arbeit in obiger Weise durchaus nicht nöthig, wenn nur die Richtung des Weges stets derjenigen der Kraft entspricht, d. h. wenn nur das Bewegte der Kraft genau folgt. Dies ist z. B. der Fall, wenn ein Arbeiter so an einer Kurbel dreht, dass die Richtung, in welcher er seine Kraft ausübt, stets senkrecht zu dem Kurbelarm ist. Dann ist die Kraft stets Tangente an den Kreis, welchen ihr Angriffspunkt beschreibt; der Weg muss aber dann auf dem Umfange dieses Kreises gemessen werden. Wenn daher z. B., wie durch Messung mittelst der dynametrischen Kurbel (§. 23) gefunden werden kann, die Kraft, mit welcher ein Arbeiter auf eine Kurbel wirkt, deren Arm 1 Fuss bayer. lang ist, 18 Zollpfd. beträgt, so ist der in der Richtung dieser Kraft für eine Umdrehung zurückgelegte Weg $2 \times 3\frac{1}{7} = 6{,}3$ Fuss, und daher die Arbeit, welche bei jeder Umdrehung geleistet wird, $18 \times 6{,}3 = 113{,}4$ Fpfd. Bei 25 Umdrehungen in der Minute beträgt also die Arbeit in der Minute 2835 Fpfd., in der Secunde 47 Fpfd. oder $\frac{47}{460} = 0{,}09$ oder ca. $\frac{1}{11}$ Pferdekraft.

Bezeichnet überhaupt bei einer Rotationsbewegung, bei welcher die Kraft stets Tangente an den Kreis ist, welchen ihr Angriffspunkt um die Drehungsachse beschreibt, p die Grösse der Kraft, l die Entfernung ihres Angriffspunktes von der Drehungsachse, n die Anzahl der Umdrehungen in der Minute und N die Zahl der Arbeitseinheiten pro Secunde für eine Pferdekraft, π die Ludolfische Zahl, so ist die zu dieser Bewegung erforderliche Leistung $\frac{2 l \pi n p}{60 N} = 0{,}1047 \frac{l n p}{N}$ Pferdekräfte.

§. 36. **Bedingungen für die Berechnung der Arbeit in der bisherigen Weise.** — Wir haben oben gesagt, dass die Arbeit einer Kraft durch das Product aus ihrer Grösse in den, in ihrer eigenen Richtung durchlaufenen Weg gemessen

wird; aber es ist dabei wohl zu berücksichtigen, dass der Weg in Folge der Wirkung der Kraft durchlaufen wird. So leistet Jemand, der in einem Schiff oder Eisenbahnwagen in der Richtung der Bewegung derselben einen Druck oder Zug an einem Gegenstand ausübt, ohne ihm jedoch eine relative Bewegung ertheilen zu können, keine nützliche Arbeit, obgleich sich in Folge der überhaupt vorhandenen Bewegung der Gegenstand in der Richtung der ausgeübten Kraft bewegt.

Aehnliches findet in dem Falle statt, wo die ausgeübte Kraft senkrecht auf der Richtung des durchlaufenen Weges steht, sie bringt dann wohl einen gewissen Druck oder eine sonstige, später zu besprechende Wirkung hervor, aber sie leistet keine nützliche Arbeit. Im Gegentheil, die durch jenen Druck hervorgerufenen Gestaltsveränderungen und Reibungshindernisse ziehen, wie wir sehen werden, Arbeitsverluste nach sich. Dies ist z. B. gleich der Fall bei dem Transport von Lasten auf horizontaler Bahn. Das Gewicht der Last bringt hier einen senkrechten Druck gegen die Bahn hervor, in Folge dessen Hindernisse gegen die Bewegung entstehen, welche jedoch weniger von dem transportirten Gewicht selber, als von der Art des Transports abhängen. So erfordert der Transport einer Last von 1000^{k} in einem auf der Erde fortgeschleiften Fahrzeug, wobei eine Reibung gleich 0,30 des Druckes erzeugt wird, eine Kraft von 300^{k} und daher pro Meter Weg eine Arbeit von 300^{km}; auf einen Wagen von gewöhnlicher Einrichtung geladen, bei welchem die Zugkraft zu $^{1}/_{30}$ der Ladung angenommen werden kann, wäre nur eine Kraft von $33{,}33^{k}$ und daher pro Meter eine Arbeit von $33{,}33^{km}$ nöthig gewesen; auf der Eisenbahn endlich, wo bei geringer Geschwindigkeit der Widerstand nicht grösser als $^{1}/_{300}$ der Ladung ist, würde man mit einer Zugkraft von $3{,}33^{k}$ und daher pro Meter mit einer Arbeit $= 3{,}33^{km}$ ausreichen. — Man sieht daraus, dass man die zum Transport von Lasten erforderliche mechanische Arbeit nicht, wie es manchmal geschieht, durch das Product aus dem transportirten Gewicht und dem durchlaufenen Weg messen darf. Die auf letztere Weise erhaltenen Resultate, die gewöhnlich zur Feststellung der Fracht berechnet werden, sind wenigstens nur für eine und dieselbe Transportmethode vergleichbar.

§. 37. **Fall, wo die Kraft nicht in der Richtung des durchlaufenen Weges wirkt.** — Als wir oben sagten, dass die von einer Kraft geleistete Arbeit gleich dem Product aus ihrer Grösse in den zurückgelegten Weg sei, fügten wir besonders noch die Bedingung hinzu, dass der Weg in der Richtung der

Kraft durchlaufen werde. Es ist nun an der Zeit, dieser Bedingung unsere nähere Aufmerksamkeit zuzuwenden. Es kommen Fälle genug vor, wo der von dem Körper durchlaufene Weg mit der Richtung der Kraft nicht übereinstimmt. So zum Beispiel, wenn ein schwerer Körper einen Berg hinabrollt. Die bewegende Kraft ist die Schwere, also vertikal abwärts gerichtet, während der Körper eine mehr oder weniger schiefe oder selbst eine krumme Linie durchläuft. Wenn im Allgemeinen der durchlaufene Weg A*a* (Fig. 24) ist, während die Kraft die Richtung AF hat, so ist der in der Richtung der Kraft durchlaufene Weg A*b*, welcher erhalten wird, wenn man von *a* auf AF eine Senkrechte fällt. Die von der Kraft geleistete Arbeit ist daher gleich dem Product aus der Kraft in das, in der Richtung derselben durchlaufene Wegstück A*b*, welches man wohl auch die Projection des wirklichen Weges A*a* auf die Richtung AF der Kraft heisst.

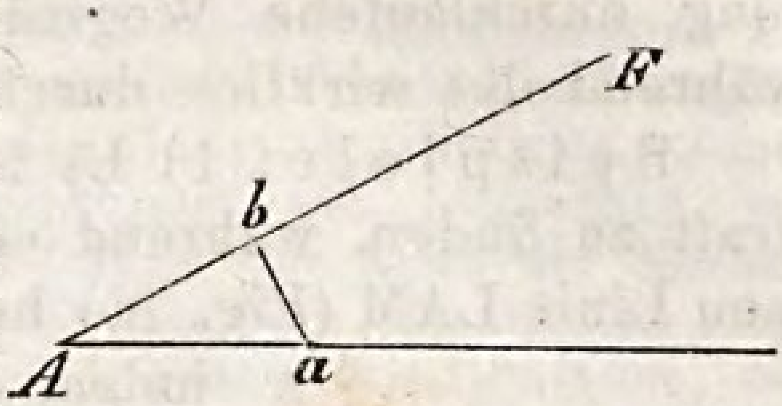


Fig. 24.

Die Richtigkeit des oben ausgesprochenen Satzes erhellt leicht aus der Betrachtung der Fig. 25. Sei AB die Richtung einer Kraft P, welche auf den Körper, der die Curve LM beschreibt, in dem Augenblick einwirkt, wo er bis zu dem Punkte A gelangt ist. Man denke sich die Linie AB als einen unausdehnbaren und vollkommen biegsamen Faden, und ersetze die Wirkung der Kraft P durch diejenige eines Gewichtes Q von derselben Grösse, das an dem Ende jenes Fadens angebracht ist, der über eine kleine Rolle *o* geleitet wurde, welche sich vollkommen leicht um ihre Achse dreht. Dann ist klar, dass bei einer sehr kleinen Bewegung des Körpers von A nach *a* die Arbeit der Kraft P durch das Product aus dem Gewichte Q in die Grösse *bb'* gemessen wird, um welche jenes abwärts gegangen ist. Nun ist die Grösse *bb'* gleich der Differenz der Längen der Linien AB und *a*B, deren Schnittpunkt B als ein augenblicklicher Berührungspunkt der Richtungen AB und *a*B mit dem äusseren Umfang der Rolle betrachtet werden kann. Diese Differenz erhält man daher auch, wenn man um B mit

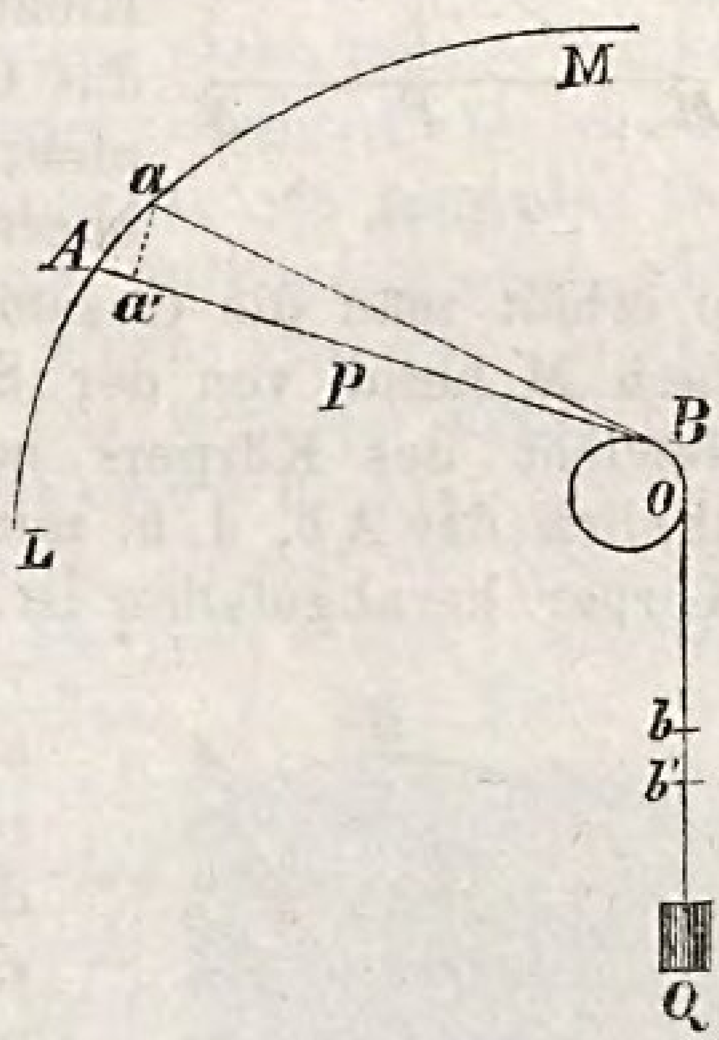


Fig. 25.

dem Halbmesser B*a* den kleinen Kreisbogen *aa'* beschreibt, als A*a'*. In dem Falle aber, wo man das Wegstückchen A*a* nur sehr klein nimmt, kann der Kreisbogen *aa'* als gerade Linie betrachtet werden, die von *a* aus senkrecht auf AB gefällt wurde. A*a'* stellt demnach die Projection des Wegstückchens A*a* auf die Richtung der Kraft P, oder den in der Richtung der Kraft durchlaufenen Weg vor, und da P = Q und *bb'* = A*a'*, so ist in der That das Product aus der Kraft P in das in ihrer eigenen Richtung durchlaufene Wegstückchen A*a'* die Arbeit jener Kraft während des wirklich durchlaufenen Wegstückchens A*a*.

Beispiele: 1) Es ist nun leicht, die Arbeit der Schwerkraft zu finden, während ein schwerer Körper längs einer krummen Linie LAM (Fig. 26) herabrollt. Betrachten wir den Körper, indem er, in A angekommen, das kleine, als gerade zu betrachtende Wegstückchen A*a* durchläuft, so ist die während dieser Zeit von der Schwerkraft, deren Richtung *a*P vertikal abwärts geht, geleistete Arbeit gleich dem Producte aus dem Gewichte des Körpers in die Höhe A*b*, welche er in der Richtung dieser Kraft durchfallen hat. Da man das Gewicht des Körpers in verschiedenen, nicht allzu grossen Höhen über der Erdoberfläche als gleich gross betrachten kann, so erhält man die Gesammtarbeit, welche auf dem Wege von L nach M herab von der Schwere geleistet wird, wenn man das Gewicht des Körpers mit der Summe aller Wegprojectionen, ähnlich der A*b*, d. h. mit der Gesammthöhe LN, um welche der Körper herabgefallen ist, multiplicirt. Diese Arbeit ist folglich von der Form der Curve LAM ganz unabhängig und nur durch den Höhenunterschied der beiden Horizontalebenen, in denen die Endpunkte L und M gelegen sind, und durch das Gewicht des Körpers bedingt.

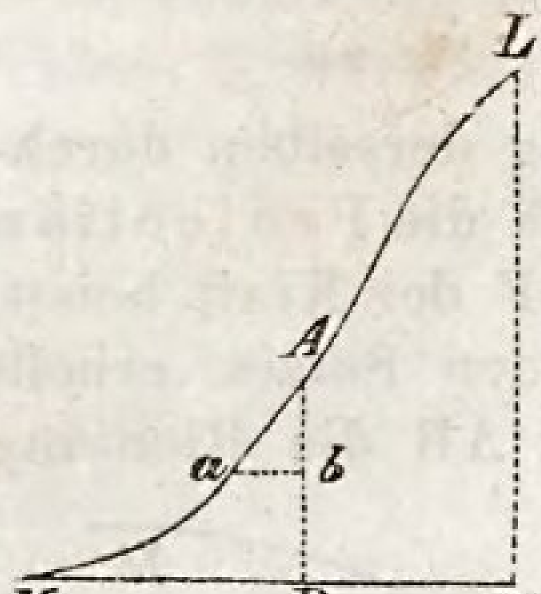


Fig. 26.

2) An einer Kurbel, deren Drehungsachse O (Fig. 26) und deren Arm OA ist, wirke eine immer gleich grosse Kraft längs der Lenkstange AM, die so lang ist, dass ihre Richtungen in den verschiedenen Stellungen der Kurbel als unter sich parallel betrachtet werden dürfen. Dann ist

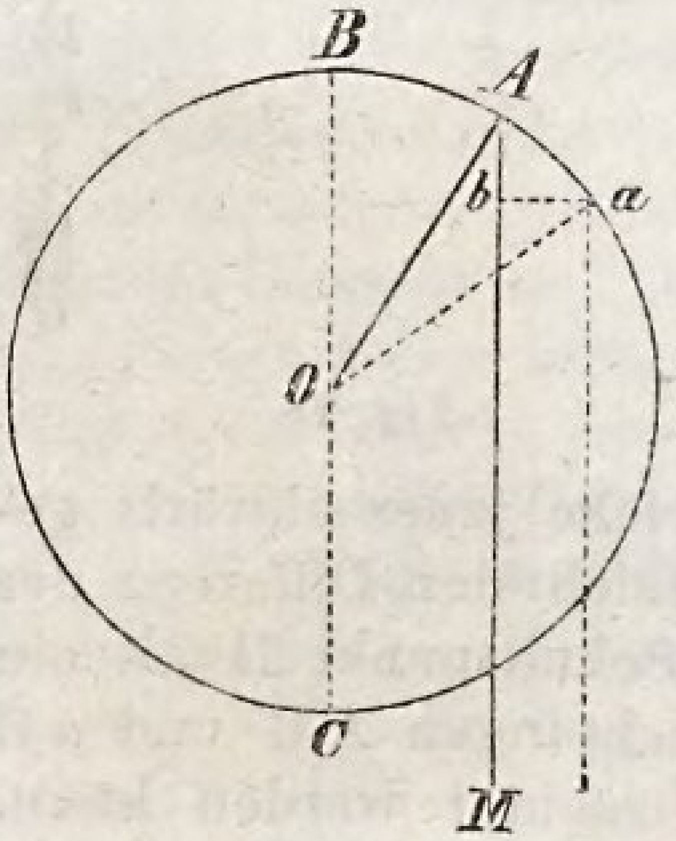


Fig. 27.

klar, dass die während einer halben Umdrehung der Kurbel geleistete Arbeit jener Kraft gleich ist dem Produkt aus ihr und der Summe der Projectionen A*b* aller der kleinen, in dem Halbkreis BAC gelegenen Bogen A*a* auf die Richtung der Kraft. Diese Summe ist offenbar gleich dem Durchmesser BC. Die während der halben Umdrehung entwickelte Arbeit ist folglich gleich dem Produkt der an der Lenkstange thätigen Kraft in den Durchmesser oder doppelten Arm der Kurbel.

Die bei jedem Hube geleistete Arbeit einer Dampfmaschine erhält man, wenn man den mittleren wirksamen Druck des Dampfes auf die Kolbenfläche mit der Länge des Hubes multiplicirt. Jener Druck pflanzt sich, von Reibungshindernissen etc. abgesehen, auf die Lenkstange fort, und die doppelte Länge des Arms der Kurbel, an welchem diese wirkt, ist genau gleich dem Hub. Es ist also nach obigem Beispiel, immer abgesehen von jenen Hindernissen, die Leistung des Dampfes, indem er auf den Kolben wirkt, genau gleich der an der Kurbel gethanen Arbeit.

§. 38. **Bewegungsarbeit, Widerstandsarbeit.** — Die Kräfte, welche an einer in Bewegung befindlichen Maschine wirken, spielen nicht alle dieselbe Rolle. Die einen suchen die Geschwindigkeit des Punktes, an welchem sie angreifen, zu vermehren; sie sind im Sinne der Bewegung dieses Punktes gerichtet, oder ihre Richtung bildet wenigstens einen spitzen Winkel mit der Richtung dieser Bewegung. Die andern suchen die Geschwindigkeit ihres Angriffspunktes zu verringern; sie sind der Bewegung dieses Punktes entweder direct entgegengesetzt, oder ihre Richtung bildet doch wenigstens einen stumpfen Winkel mit der Richtung seiner Bewegung. Die ersteren nennt man bewegende, die letzteren widerstehende Kräfte. Zu den letzteren gehören, wie wir sehen werden, allemal die Reibung, der Widerstand der Luft u. s. f. Es ist übrigens leicht, zwischen beiden Arten von Kräften zu unterscheiden. In dem Falle, wo die Projection AC (Fig. 28) des Weges AB, der in dem Sinne von A nach B durchlaufen werde, in der Richtung der Kraft F liegt, die auf den Körper wirkt, ist diese Kraft eine bewegende; in dem Falle dagegen, wo die Projection AC (Fig. 29) des Weges AB, der wieder in dem Sinne von A nach B zurückgelegt werde, der Richtung der Kraft F entgegengesetzt ist, gehört diese Kraft in die Klasse der widerstehenden. Eine und die nämliche Kraft kann bald als bewegende,

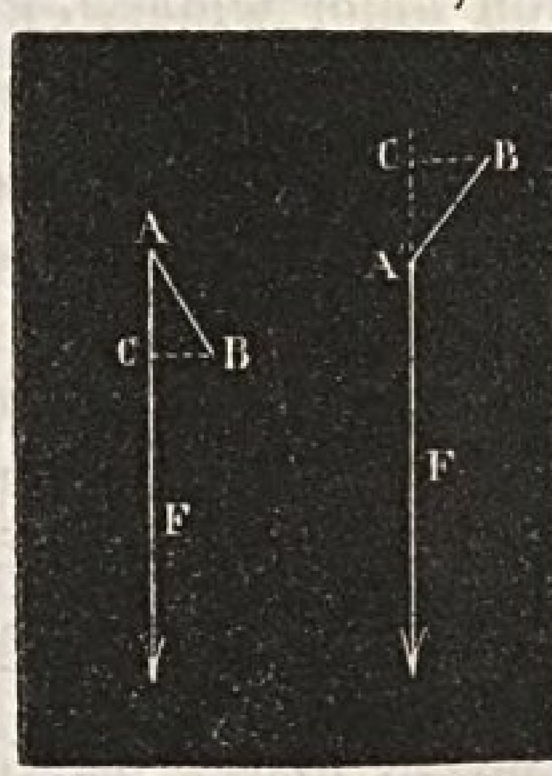


Fig. 28. Fig. 29.

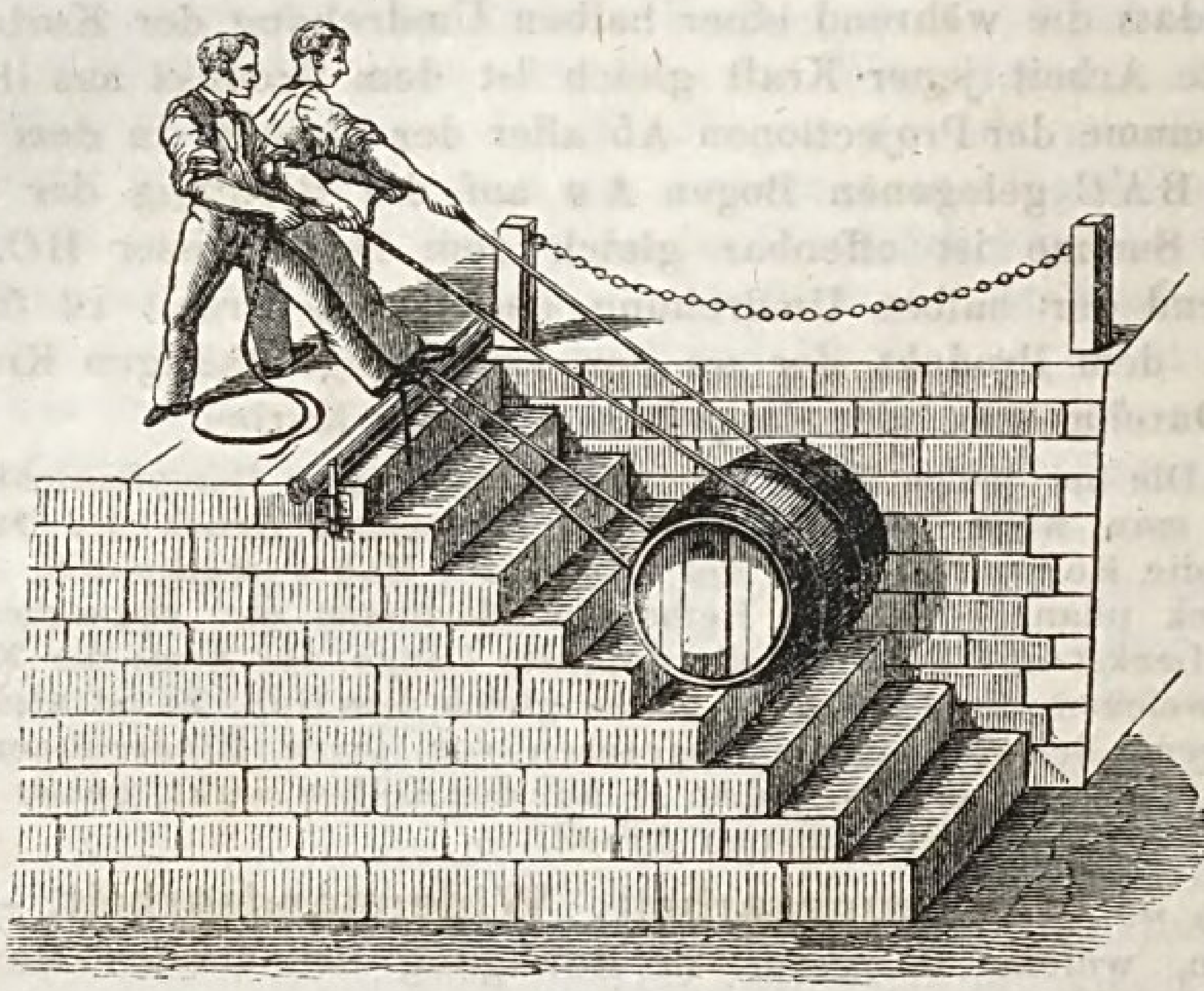


Fig. 30.

bald als widerstehende auftreten. Wenn ein Fass auf die Art, wie es die Fig. 30 anschaulich macht, eine Treppe hinabgelassen wird, so ist das Gewicht des Fasses die bewegende Kraft, wogegen die Kräfte, welche die Männer aufbieten, die die Seilenden in den Händen haben, widerstehende Kräfte sind. Wenn die Männer, indem sie an dem Seil ziehen, das Fass aufwärts bewegen, so sind die von ihnen aufgebotenen Zugkräfte die bewegenden Kräfte, das Gewicht des Fasses dagegen ist die widerstehende Kraft.

Die Arbeit, welche von einer bewegenden Kraft geleistet wird, heisst B e w e g u n g s a r b e i t, wogegen diejenige, welche von einer widerstehenden Kraft entwickelt wird, W i d e r s t a n d s-a r b e i t genannt wird.

§. 39. **Allgemeinster Fall der Bestimmung der Arbeit einer Kraft.** — Wenn der Angriffspunkt einer Kraft eine krumme Linie beschreibt, wenn ferner die Grösse dieser Kraft veränderlich ist, und wenn endlich die Richtung der Kraft mit der Richtung der Bahn einen veränderlichen Winkel bildet, so findet man die Arbeit dieser Kraft auf folgende Weise.

Man zeichnet sich die krumme Linie $abcd$ (Fig. 31), welche der Körper beschreibt, auf und theilt dieselbe in so viele und so kleine Theilchen ab, bc, cd, dass man ohne merklichen Fehler annehmen darf, dass während der Zeit, welche der

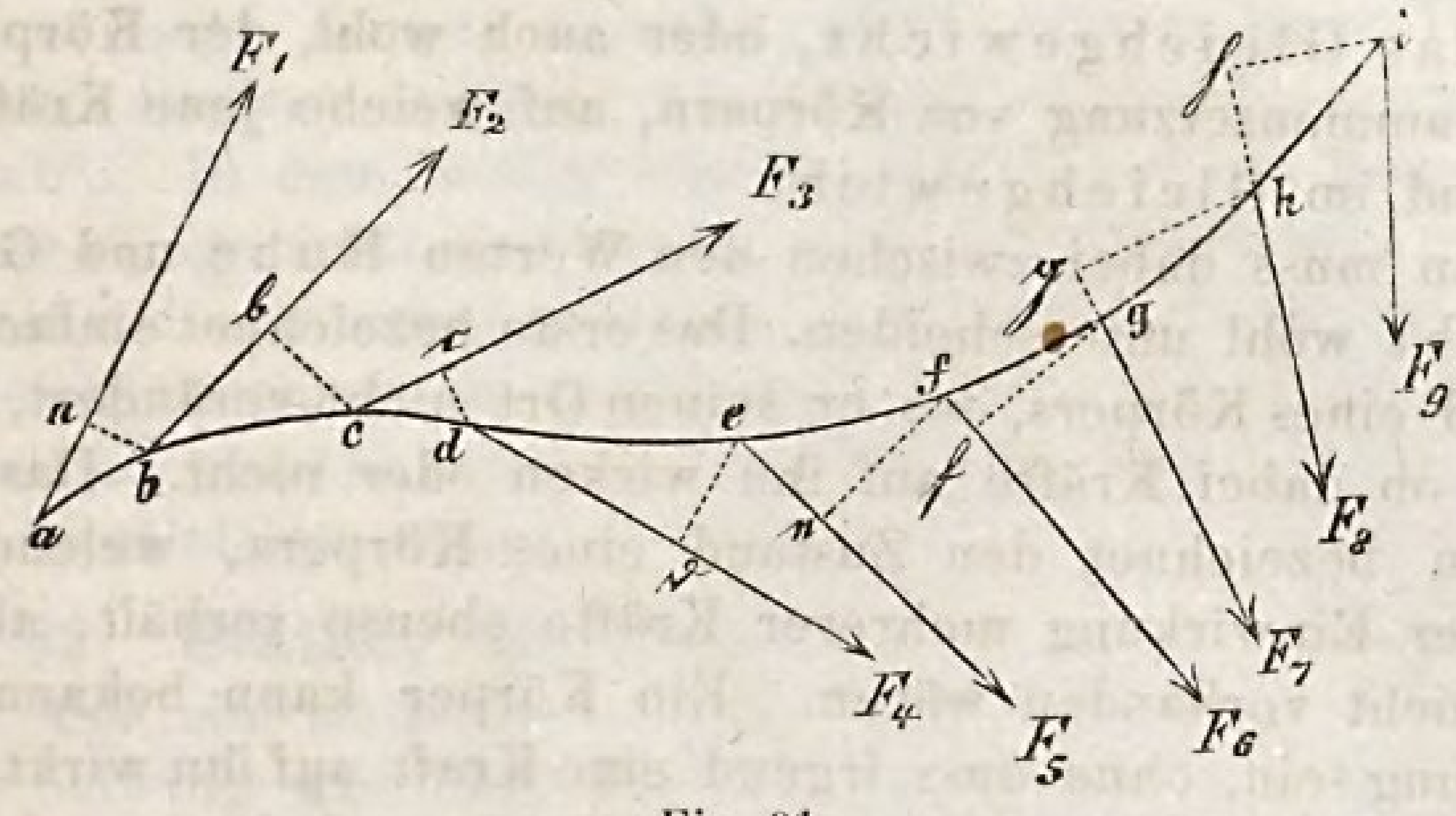


Fig. 31.

Körper zu ihrer Zurücklegung braucht, die Kraft nach Richtung und Stärke constant und zwar genau so, wie am Anfang des Wegstückchens bleibe. In den Theilungspunkten a, b, c, d stelle man alsdann die Kraft den Richtungen und Grössen nach, welche sie hat, während der Körper diese Stellen passirt, durch gerade Linien $a F_1$, $b F_2$, $c F_3$ vor (§. 24) und projicire die Wegstückchen ab, bc, cd durch Fällung der Senkrechten $b\mathfrak{a}$, $c\mathfrak{b}$, $d\mathfrak{c}$ auf die Richtungen der Kraft als $a\mathfrak{a}$, $b\mathfrak{b}$, $c\mathfrak{c}$, $d\mathfrak{d}$ Dann sind nach dem Vorausgehenden und zufolge der obigen Voraussetzungen die Produkte aus den verschiedenen Grössen $a F_1$, $b F_2$, $c F_3$, $d F_4$ der Kraft in die in ihrer jedesmaligen Richtung durchlaufenen Wegstückchen $a\mathfrak{a}$, $b\mathfrak{b}$, $c\mathfrak{c}$, $d\mathfrak{d}$ gleich den Arbeiten, welche die Kraft leistet, indem der Körper bezüglich die Strecken ab, bc, cd durchläuft. Die gesammte, von jener Kraft geleistete Arbeit, ohne Rücksicht darauf, ob sie Bewegungs- oder Widerstandsarbeit ist, wird durch Summirung aller der obigen Produkte erhalten. Wenn aber, wie es in den allermeisten Fällen stattfindet, zwischen jenen beiden Arten von Arbeiten unterschieden werden muss, so wird man eben blos diejenigen Produkte, welche Bewegungsarbeiten ausdrücken, für sich, und ebenso diejenigen, welche Widerstandsarbeiten bedeuten, für sich addiren. Im Falle unserer Figur z. B. leistet die veränderliche Kraft von a bis g Bewegungs-, von g bis i Widerstandsarbeit.

§. 40. **Gleichgewicht.** — Es ist klar, dass mehrere Kräfte, welche auf einen Körper oder auf eine Zusammensetzung von Körpern wirken, möglicherweise auch so beschaffen sein können, dass sie sich gegenseitig aufheben, vernichten; dass sich der Körper ganz ebenso verhält, als wenn diese Kräfte gar nicht

vorhanden wären. In diesem Falle sagt man, die Kräfte halten sich das Gleichgewicht, oder auch wohl, der Körper oder die Zusammensetzung von Körpern, auf welche jene Kräfte wirken, sind im Gleichgewicht.

Man muss dabei zwischen den Worten Ruhe und Gleichgewicht wohl unterscheiden. Das erste bezeichnet einfach jenen Zustand eines Körpers, wo er seinen Ort nicht verändert, gleichgiltig, ob dabei Kräfte auf ihn wirken oder nicht. Das zweite dagegen bezeichnet den Zustand eines Körpers, welcher sich, trotz der Einwirkung mehrerer Kräfte ebenso verhält, als wenn diese nicht vorhanden wären. Ein Körper kann bekanntlich in Bewegung sein, ohne dass irgend eine Kraft auf ihn wirkt (§. 19); wenn man an einem solchen Körper Kräfte anbringt, welche sich das Gleichgewicht halten, so wird seine Bewegung nicht im geringsten gestört, weil diese Kräfte sich gegenseitig aufheben. Das Gleichgewicht der Kräfte, welche auf einen Körper wirken, erfordert daher nicht nothwendig, dass man sich dabei den Körper als unbewegt vorstelle. Die Worte Ruhe und Gleichgewicht haben also wesentlich verschiedene Bedeutung.

§. 41. **Stabiles und labiles Gleichgewicht.** — Im gewöhnlichen Leben legt man dem Worte Gleichgewicht eine andere Bedeutung bei, als wir ihm hier zugeschrieben haben. Man sagt, man habe einen Körper in's Gleichgewicht gebracht, wenn man ihm eine solche Stellung hat geben können, in der er zwar in Ruhe bleibt, aus welcher er sich aber durch die Einwirkung der geringfügigsten äusseren Ursache alsbald entfernt, ohne wieder dahin zurück zu kehren. Wenn man es z. B. dahin gebracht hat, einen Kegel so auf den Tisch zu stellen, dass er auf seiner Spitze steht (Fig. 32), ohne nach der einen oder andern Seite umzufallen, so sagt man, dass man ihn in's Gleichgewicht gebracht habe. Für uns ist der Kegel eben so gut im Gleichgewicht, ob er mit seiner Basis auf dem Tische aufruht (Fig. 33) oder mit seiner Spitze. In dem einen wie in dem andern Fall wird die Kraft, welche den Kegel zum Falle bringen würde, wenn ihn nicht der Tisch davon zurückhielte, durch den Widerstand des Tisches im Gleichgewicht gehalten. Beide Fälle unterscheiden sich aber dadurch von ein-

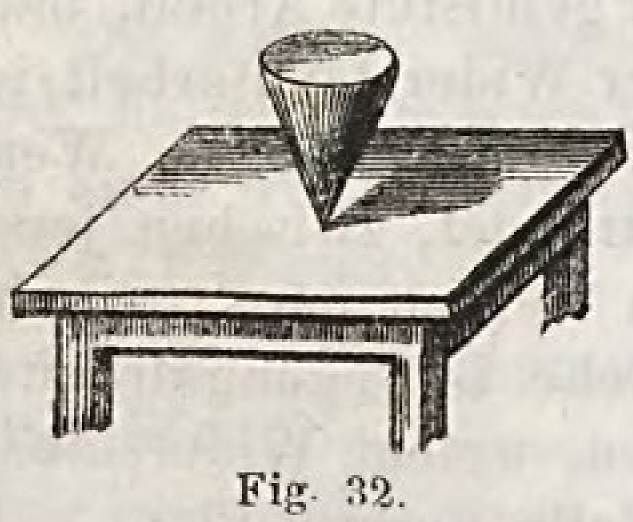


Fig. 32.

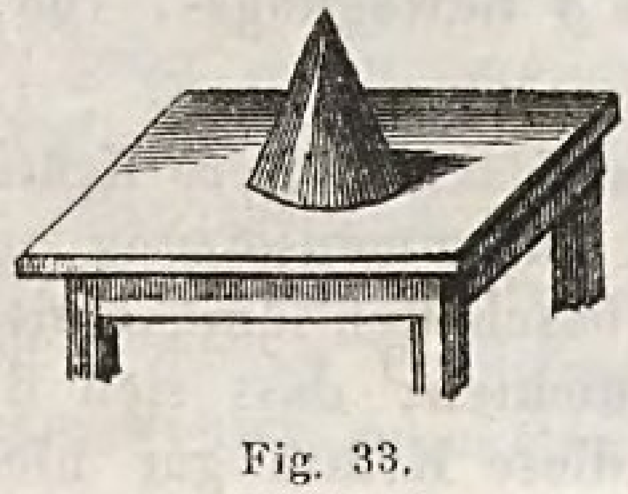


Fig. 33.

ander, dass, wenn man in dem einen, Fig. 32, den Kegel etwas aus seiner Lage bringt, derselbe nicht mehr in diese Lage zurückkehrt, sondern umfällt; das Gleichgewicht ist unhaltbar oder labil. In dem andern Fall dagegen kehrt der Kegel, wenn man seine Lage verändert, indem man die Spitze etwas zur Seite zieht, alsbald von selbst in seine ursprüngliche Stellung zurück; das Gleichgewicht ist haltbar oder stabil. Es ist also das, was man im gewöhnlichen Leben Gleichgewicht nennt, für uns das labile Gleichgewicht.

§. 42. **Statik, Dynamik.** — Denken wir uns einen Körper oder eine Zusammensetzung von Körpern von irgend einer Anzahl beliebig wirkender Kräfte angegriffen, so besteht die allgemeinste Aufgabe der Mechanik darin, das Verhalten des Körpers unter dem Einfluss dieser Kräfte zu bestimmen. Im Allgemeinen wird offenbar eine Bewegung des Körpers eintreten, und es ist dann die Aufgabe desjenigen Theils der Mechanik, den man Dynamik (Bewegungslehre) nennt, die Gesetze dieser Bewegung zu erforschen. In besonderen Fällen werden aber jene Kräfte auch im Gleichgewicht sein können, und man nennt gewöhnlich den Theil der Mechanik, der sich mit der Aufstellung der Bedingungen beschäftigt, welche die Kräfte in diesen Fällen zu erfüllen haben, die Statik (Gleichgewichtslehre). Beide aber, die Untersuchungen über das Gleichgewicht, wie über die Bewegung werden wesentlich vereinfacht, wenn man die gegebenen Kräfte durch eine Mittelkraft oder doch durch eine möglichst geringe Anzahl von Kräften, zu ersetzen sucht, welche die nämliche Wirkung ausüben wie sie. Wir werden uns daher zunächst mit dieser letzteren Aufgabe beschäftigen, wobei wir nach und nach von den einfacheren zu den zusammengesetzteren Fällen fortschreiten werden. Dabei wird es nicht schwierig sein, sogleich die Bedingungen herauszuheben, unter welchen die gegebenen Kräfte im Gleichgewicht sind, wogegen die Untersuchung der in anderen Fällen stattfindenden Bewegung einem späteren Kapitel aufbehalten werden muss.

II. Zusammensetzung und Zerlegung der Kräfte; Statik.

§. 43. **Mittelkraft, Seitenkräfte.** — Wenn mehrere Kräfte auf ein und denselben festen Körper wirken, so ist es häufig möglich, eine andere Kraft zu finden, welche, wenn sie allein auf den Körper wirkt, genau dieselbe Wirkung wie jene hervorbringt.

So sieht man leicht, dass mehrere Pferde, welche an einen Wagen gespannt sind, durch einen einzigen Motor ersetzt werden können, eine Locomobile z. B., welche, an dem Wagen ziehend, ihm dieselbe Bewegung ertheilt; die Zugkraft der Locomobile bringt also dieselbe Wirkung hervor, wie die verschiedenen gleichzeitig wirkenden Kräfte der Pferde.

Die eine Kraft, welche für mehrere andere, gleichzeitig an einem Körper angreifenden Kräfte gesetzt werden kann, ohne dass die auf den Körper ausgeübte Wirkung geändert wird, heisst die Mittelkraft (Resultante) dieser Kräfte; diese ihrerseits heissen die Seitenkräfte (Componenten oder Composanten). Unter der Zusammensetzung der Kräfte versteht man die Aufsuchung der Mittelkraft, wenn die Seitenkräfte gegeben sind. Umgekehrt kann natürlich auch eine einzige Kraft durch mehrere andere ersetzt werden, welche die nämliche Wirkung wie sie haben. Wenn man dies thut, so sagt man, es werde die gegebene Kraft in die anderen zerlegt.

§. 44. **Kräfte, deren Richtungen sämmtlich in die nämliche gerade Linie fallen.** — Der einfachste Fall für die Zusammensetzung von Kräften zu einer Mittelkraft ist der, wo die Richtungen sämmtlicher Kräfte in einer geraden Linie liegen. Wenn z. B. ein Körper unter dem Einfluss dreier Kräfte von 3^k, 5^k und 6^k steht, welche sämmtlich in dem Punkt A (Fig. 34) angreifen und nach der nämlichen Richtung AB hin in demselben Sinne wirken, so befindet er sich offenbar unter denselben Umständen, als wenn, die Linie AB als vertikal angenommen, in dem Punkte A drei Gewichte von 3^k, 5^k und 6^k aufgehängt wären. Dieselben üben aber nach dem, was oben (§. 22) gesagt wurde, die nämliche Wirkung aus, als ein einziges Gewicht von 14^k, gleich der Summe von 3, 5 und 6 Kilogrammen. Daraus folgt also, dass beliebig viele Kräfte, die alle in demselben Punkt angreifen und in gleichem Sinne nach der nämlichen Richtung hin wirken, eine Resultante haben, die gleich ihrer Summe ist, und die in derselben Richtung und auch in dem nämlichen Sinne wirkt wie die Seitenkräfte.

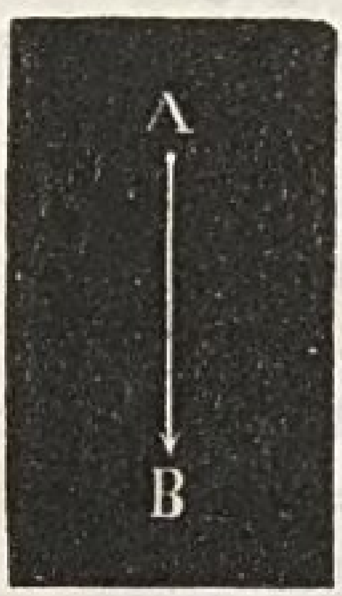


Fig. 34.

Wenn auf einen Körper zwei gleich grosse Kräfte wirken, die in dem nämlichen Punkte angreifen und in derselben geraden Linie aber in entgegengesetztem Sinne wirken, so halten sich diese Kräfte das Gleichgewicht. Sie können offenbar einen Körper, der in Ruhe ist, nicht in Bewegung bringen und

die Bewegung eines Körpers, auf den sie einwirken, nicht abändern. — Es ist dieser einfachste Fall des Gleichgewichts zugleich derjenige, wo wir von dem Stattfinden desselben eine unmittelbare Ueberzeugung gewinnen können. Alle anderen Fälle lassen sich, wie sich zeigen wird, auf ihn zurückführen.

Betrachten wir nun einen Körper, auf welchen eine beliebige Anzahl von Kräften wirkt, die alle in dem nämlichen Punkt A (Fig. 35) angreifen, und deren Richtungen alle in dieselbe gerade Linie fallen, die aber zum Theil in entgegengesetztem Sinne wirken. Beispielsweise mögen drei Kräfte von 3, 5 und 6 Kilogrammen in der Richtung von A nach B, zwei andere von 4 und 7 Kilogrammen in der entgegengesetzten Richtung von A nach C an dem gemeinschaftlichen Angriffspunkte A thätig sein. Die drei ersten Kräfte kann man durch eine Kraft von 14^k, die in dem Sinne AB wirkt, und die beiden letzten durch eine Kraft von 11^k in entgegengesetztem Sinne AC ersetzen. Die Kraft von 14^k kann aber betrachtet werden, als ob sie aus der Zusammensetzung einer Kraft von 11^k und einer andern von 3^k hervorgegangen wäre, die alle beide nach AB hinwirken. Die erstere von diesen beiden Seitenkräften wird durch die gleichgrosse Kraft, die im entgegengesetzten Sinne wirkt, aufgehoben, und es bleibt blos noch die Kraft von 3^k, die im Sinne AB wirkt und die fünf gegebenen Kräfte vollständig ersetzt. Will man also mehrere Kräfte, die auf denselben Punkt nach derselben Richtung, aber in verschiedenem Sinne wirken, in eine Kraft vereinigen, so muss man nach dem eben Entwickelten alle Kräfte, die in dem einen Sinne, und hierauf alle Kräfte, die in dem entgegengesetzten Sinne wirken, addiren und die kleinere der so erhaltenen beiden Summen von der grösserern abziehen: die Differenz ist die Resultante der gegebenen Kräfte. Diese Resultante wirkt in dem Sinne der grösseren der beiden Summen, welche man vorhin erhielt. Wenn die Summe der in dem einen Sinn wirkenden Kräfte gleich ist der Summe der im entgegengesetzten Sinn wirkenden, so findet Gleichgewicht statt.

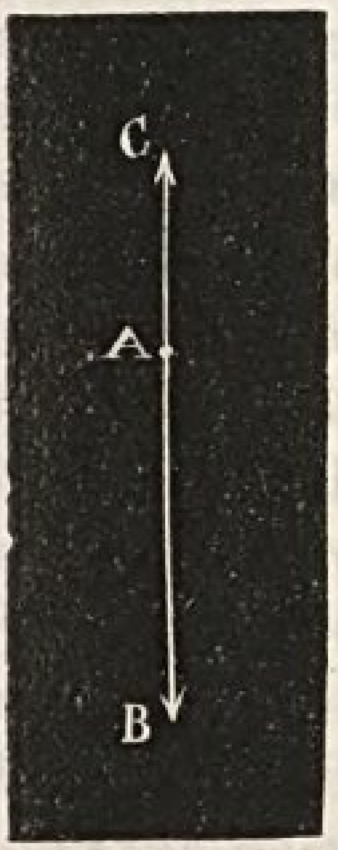


Fig. 35.

Wir haben in §. 25 gezeigt, dass der Angriffspunkt einer Kraft in der geraden Linie, nach welcher sie wirkt, beliebig verlegt werden darf. Wenn daher auf einen Körper mehrere Kräfte, alle nach ein und derselben geraden Linie, aber in verschiedenen Punkten angreifend wirken, so kann man die Angriffspunkte aller dieser Kräfte in einen gemeinschaftlichen Punkt jener geraden

Linie verlegen. Somit ist dieser allgemeine Fall auf einen der bereits behandelten zurückgeführt, wo wir vorausgesetzt haben, dass sämmtliche Kräfte in dem nämlichen Punkt angreifen. Der Angriffspunkt der so gefundenen Mittelkraft kann natürlich an einer beliebigen Stelle der Geraden, in welcher die Richtungen sämmtlicher Kräfte liegen, angenommen werden.

§. 45. **Parallele Kräfte.** — Der nächst zusammengesetztere Fall ist der, wo die Kräfte, welche in eine Mittelkraft zu vereinigen sind, zwar in parallelen, aber nicht in eine einzige Gerade zusammenfallenden Richtungen wirken, wo also ihre Angriffspunkte nicht blos verschieden sind, sondern auch durch Verlegung in der Richtung der Kräfte nicht in einen einzigen zusammenfallend gemacht werden können. Indem wir auch hier wieder vom Einfacheren ausgehen, bedienen wir uns zunächst des folgenden Apparates, um das Aufsuchen der Mittelkraft zweier paralleler, im gleichen Sinne gerichteter Kräfte zu zeigen: Ein prismatischer Stab AB (Fig. 36) von Holz kann sich um eine, durch seine Mitte gehende Achse drehen, welche durch die nach unten gerichtete Kante eines kleinen Stahlprisma's gebildet wird, das quer durch den Stab gesteckt ist und auf beiden Seiten etwas hervorragt. Die beiden Seitenflächen des Stahlprisma's, die sich in jener Kante schneiden, sind sorgfältig zugeschliffen, so dass sie eine gute Schneide bilden. Diese Schneide stützt sich auf beiden Seiten auf zwei ebene, durch kleine Stahlstückchen gebildete Unterlagen, die in eine Art Zwinge eingelassen sind. Diese Zwinge ist an einer Säule CD so befestigt, dass sich der Stab AB frei um seine Achse drehen kann. Auf der vordern Seite des Stabs sind zu beiden Seiten des Aufhängepunktes 10 Theile von gleicher Länge aufgetragen und unter den Theilstrichen kleine Ringe befestigt, an welchen Gewichte aufgehängt werden können. Diese

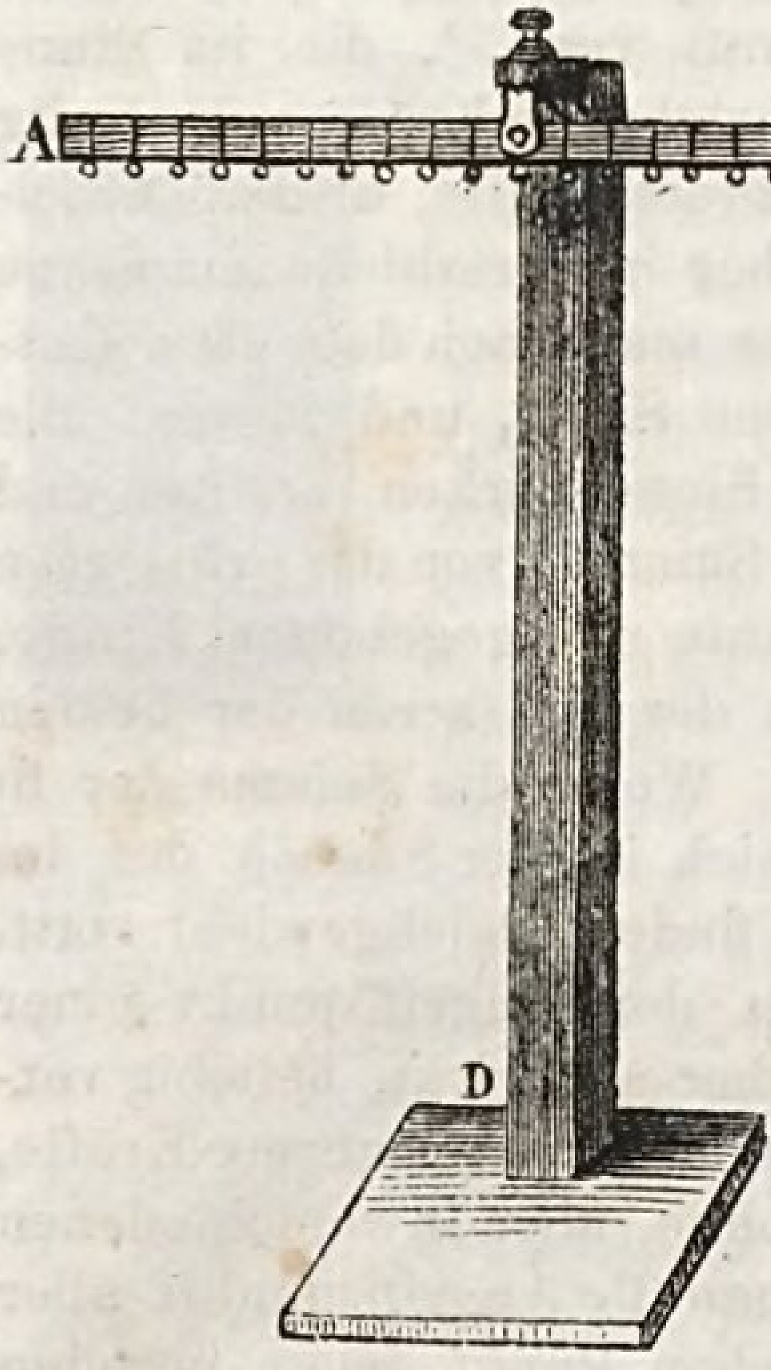
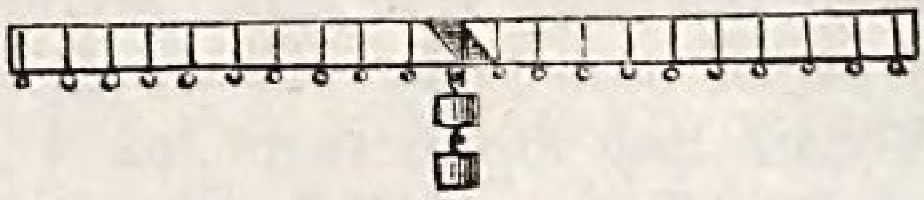


Fig. 36.

Gewichte sind so gemacht, dass sie auch auf ihrer untern Seite einen kleinen Haken tragen, um unter jedes derselben ein zweites, unter dieses dann wieder ein drittes etc. aufhängen zu können.

Wenn man nun zunächst an zwei Punkten des Stabes, die gleichweit von der Mitte entfernt sind, zwei gleichgrosse Gewichte aufhängt, jedes z. B. von 100 Gramm (Fig. 37), so sieht man leicht, dass der Stab horizontal bleiben wird. Es ist kein Grund vorhanden, warum er sich auf die Seite der einen der beiden gleich grossen Kräfte eher neigen sollte als auf die der anderen. Wenn man alsdann die beiden Gewichte wieder aushebt und sie unter einander in der Mitte des Stabs aufhängt (Fig. 38), so bleibt derselbe noch horizontal, und man wird leicht zugeben, dass in dem einen, wie in dem andern Fall die Schneide ganz denselben Druck auf die kleinen Stahlplatten ausübt, auf welchen sie aufruht. Wenn man einigen Zweifel darüber hegen sollte, so dürfte man nur die Zwinge, welche jene Stahlplättchen trägt, an einer Dynamometerfeder aufhängen, und man würde sehen, dass diese in beiden Fällen gleich stark gebogen würde. Die Fig. 37 stellt den Stab unter der Einwirkung zweier gleicher und paralleler Kräfte dar; aus dem Vorhergehenden folgt, dass diese zwei Kräfte durch eine einzige Kraft ersetzt werden können, die doppelt so gross als jede von ihnen und parallel zu ihnen ist, und deren Angriffspunkt in der Mitte der geraden Linie liegt, welche ihre Angriffspunkte verbindet.


Fig. 37.


Fig. 38.

Denken wir uns nun, dass längs des Stabes AB 11 Gewichte, jedes von 1 Hektogramm in gleichen Zwischenräumen so aufgehängt werden, dass das mittelste von ihnen gerade unter die Drehungsachse des Stabs zu hängen kommt, wie es Fig. 39 zeigt. Der in solcher Weise ganz regelmässig belastete Stab wird offenbar in horizontaler Lage verharren. Aber nach dem, was oben gesagt wurde, kann man zwei Gewichte, die sich in gleicher Entfernung vom Mittelpunkt befinden, ausheben und unter der Mitte aufhängen, ohne dass ihre Wirkung auf den Stab, der natürlich als vollkommen unbiegsam vorausgesetzt wird, sich

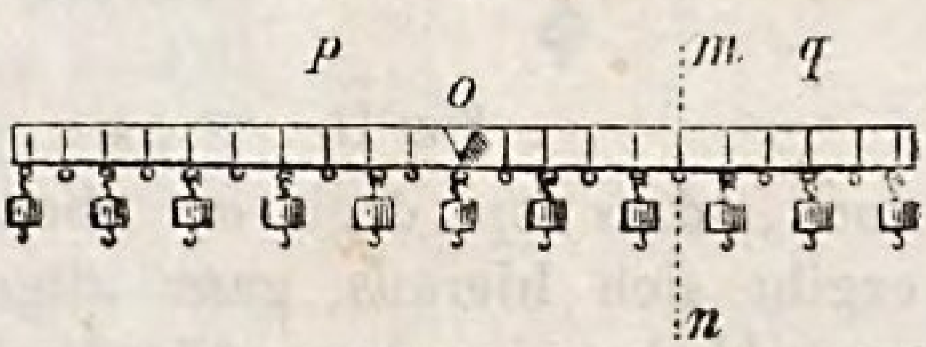


Fig. 39.

ändert: derselbe wird nach wie vor horizontal bleiben und den nämlichen Druck auf die ihn tragende Zwinge ausüben. Wenn man auf diese Weise nach und nach je zwei der Gewichte, welche gleichmässig über die Länge des Stabs vertheilt sind, in die Mitte desselben versetzt, so wird man zuletzt die Anordnung erhalten, wie sie die Fig. 40 darstellt; und man wird daraus schliessen, dass sich der Stab AB, wenn er mit 11 Gewichten, jedes von 1 Hektogramm, belastet ist, die gleichmässig über seine ganze Länge vertheilt sind, unter denselben Bedingungen befindet, als wenn ein einziges Gewicht von 11 Hektogramm in seiner Mitte aufgehängt wäre.

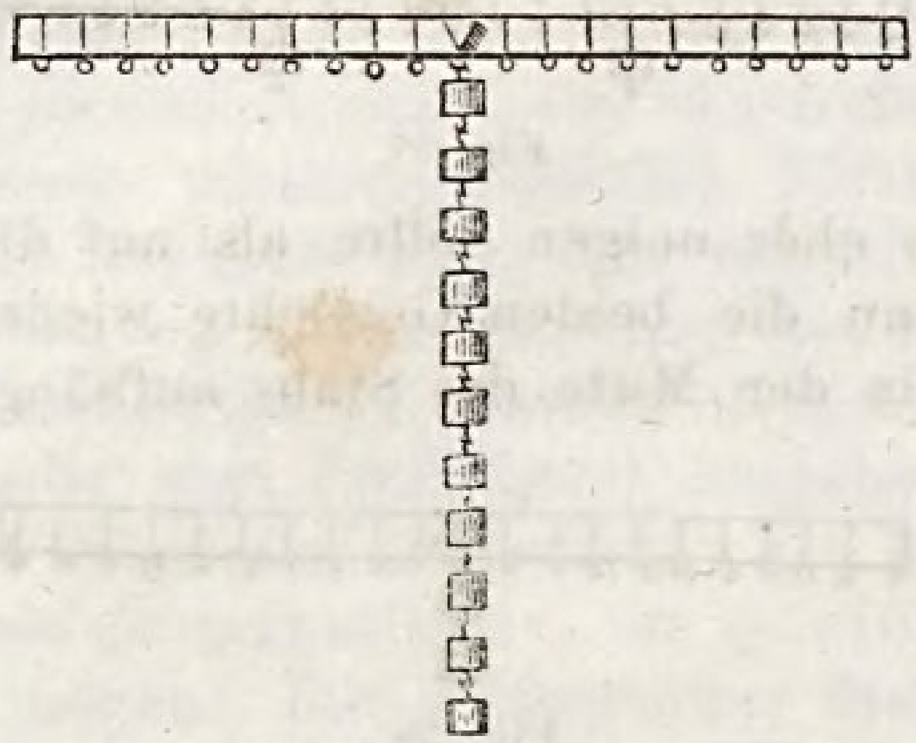


Fig. 40.

Kehren wir nun wieder zu dem gleichmässig belasteten Stab der Fig. 39 zurück, und theilen die 11 Gewichte, welche er trägt, durch die Linie *mn* in zwei Gruppen, sodass sich 8 dieser Gewichte auf der Linken und 3 auf der rechten Seite dieser Linie befinden. Die 8 Gewichte zur Linken können, wie eben gezeigt wurde, in dem Punkte *p* vereinigt werden, der sich in der Mitte der Länge befindet, über welche sie gleichmässig vertheilt sind; eben so kann man die drei Gewichte zur Rechten in dem Punkte *q* vereinigen. Dadurch erhalten die Gewichte an dem Stab die in Fig. 41 dargestellte Anordnung, ohne dass sich ihre Wirkung auf den Stab geändert hätte. Zwei Gewichte also, das eine von 8, das andere von 3 Hektogramm, von denen das erste in *p*, das zweite in *q* aufgehängt ist, bringen dieselbe Wirkung hervor, als ein einziges Gewicht von 11 Hektogramm, das im Punkt *o* aufgehängt ist. Beachtet man nun noch, dass *op* drei, *oq* aber 8 Theile des Stabs enthält, so ergibt sich hieraus ganz allgemein der folgende Satz: Zwei parallele, in dem nämlichen Sinn gerichtete Kräfte P, Q (Fig. 42), welche an einem festen Körper M angreifen, haben eine Resultante R gleich ihrer Summe

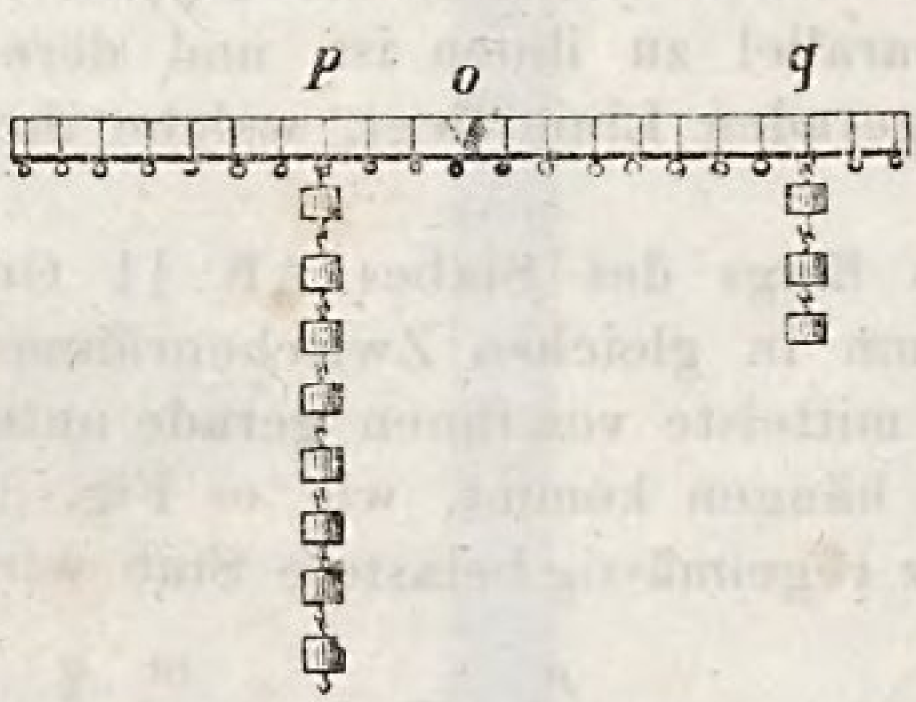


Fig. 41.

und parallel zu ihnen, deren Angriffspunkt c die Entfernung der Angriffspunkte a, b der beiden Seitenkräfte in 2 Theile theilt, welche den Grössen dieser Seitenkräfte umgekehrt proportional sind.

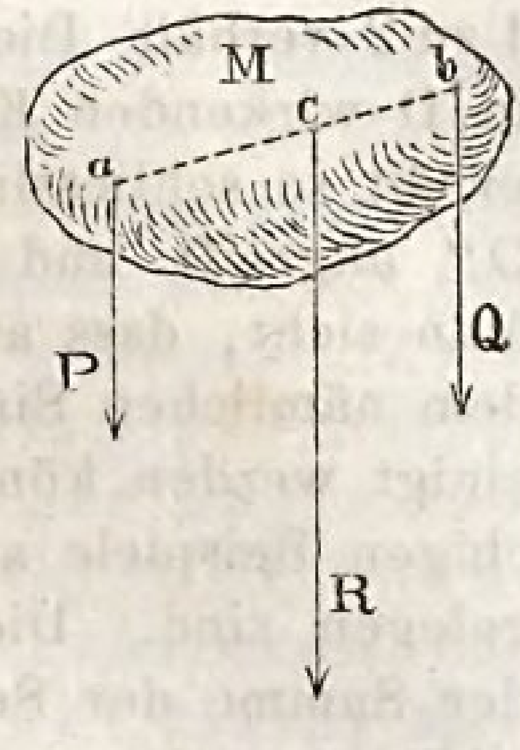


Fig. 42.

Bezeichnen P und Q die Grössen der beiden parallelen und gleich gerichteten Kräfte und p und q die Entfernungen ac und bc (Fig. 42) ihrer Angriffspunkte von dem der Mittelkraft R, so bestehen nach obigem Satze die Formeln:

$$R = P + Q,$$
$$P : Q = q : p.$$

Umgekehrt kann nun auch jede Kraft R (Fig. 42) durch zwei ihr parallele und in gleichem Sinn gerichtete Kräfte P, Q, die ganz dieselbe Wirkung haben, ersetzt werden. Man darf diese Kräfte nur so annehmen, dass ihre Summe gleich der gegebenen Kraft ist, und dass ihre Angriffspunkte a, b auf einer durch den Angriffspunkt c jener Kraft gezogenen geraden Linie zu beiden Seiten dieses Angriffspunktes so gelegen sind, dass sich ihre Entfernungen von demselben umgekehrt verhalten, wie die Kräfte selbst. Man sagt in diesem Fall, die gegebene Kraft sei in die beiden Seitenkräfte **zerlegt** worden. Da jede dieser beiden Seitenkräfte auf dieselbe Weise in 2 weitere zerlegt werden kann u. s. f., so ist klar, dass man jede gegebene Kraft durch eine beliebige Anzahl paralleler Kräfte ersetzen kann, deren Mittelkraft sie ist.

§. **46.** Der Körper M (Fig. 43) werde von 4 parallelen und in dem nämlichen Sinn wirkenden Kräften angegriffen. Die eine von 3^k habe ihren Angriffspunkt im Punkte A, die andere von 5^k in B, die dritte von 4^k in C und die vierte von 1^k im Punkte D. Die zwei Kräfte, welche in den Punkten A und B angebracht sind, können durch eine Kraft von 8^k ersetzt werden, welche in dem Punkte O angreift, der so gelegen ist, dass sich OA zu OB wie 5 zu 3 verhält. Diese Kraft von 8^k kann nun mit der in dem Punkte C wirkenden Kraft vereinigt werden, woraus eine Kraft von 12^k hervorgeht, die im Punkte O′ angreift, vorausgesetzt, dass sich O′O zu O′C wie 4 zu 8, also wie

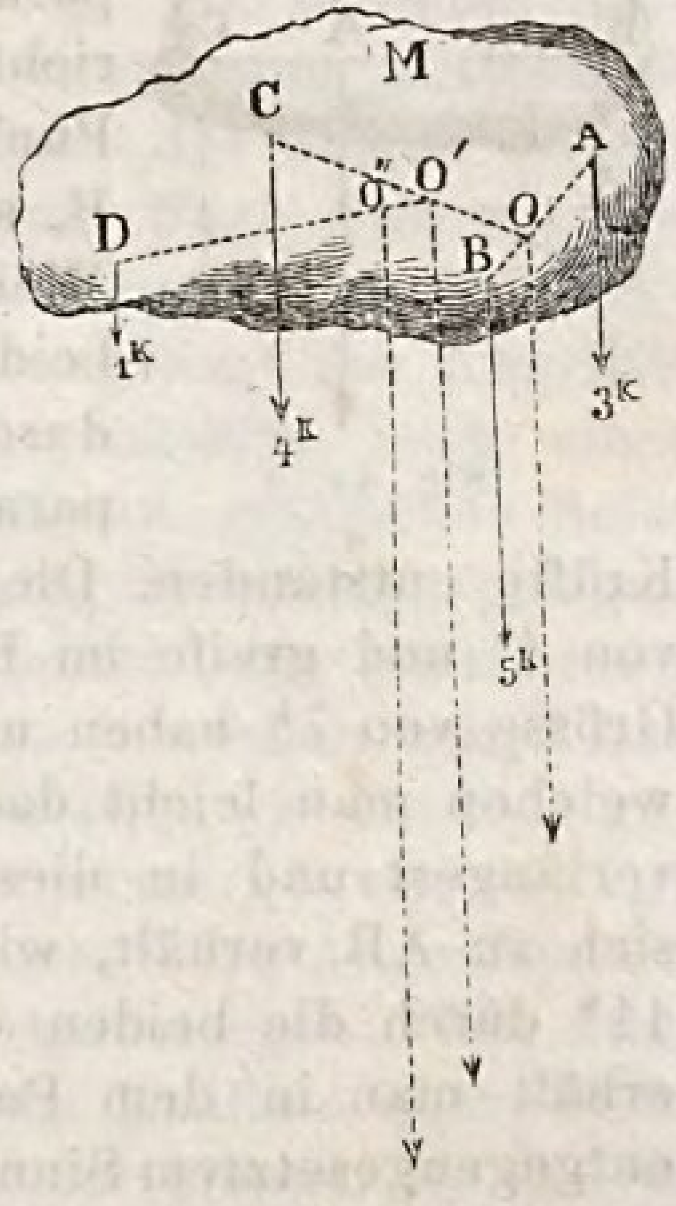


Fig. 43.

1 zu 2 verhält. Diese Mittelkraft endlich setzt sich noch mit der in D wirkenden Kraft in ähnlicher Weise zusammen, und man erhält so schliesslich eine Kraft von 13^k, welche in dem Punkte O'' angreift und die Mittelkraft von sämmtlichen Kräften ist. Man sieht, dass auf diese Weise beliebig viele parallele und in dem nämlichen Sinne gerichtete Kräfte in eine Mittelkraft vereinigt werden können, auch wenn sie nicht gerade, wie in dem obigen Beispiele angenommen wurde, sämmtlich in einer Ebene gelegen sind. Die Grösse dieser Mittelkraft ist immer gleich der Summe der Seitenkräfte, und was ihren Angriffspunkt betrifft, so geht aus der Art und Weise, wie oben der Punkt O'' gefunden wurde, hervor, dass seine Lage zwar von dem Grössenverhältniss der Kräfte und der gegenseitigen Lage ihrer Angriffspunkte, nicht aber von ihrer gemeinschaftlichen Richtung abhängig ist. Wenn man im obigen Beispiele sämmtlichen vier Kräften, jedoch ohne ihre Grössen und ihre Angriffspunkte zu ändern, durch gemeinschaftliche Drehung eine andere Richtung überhaupt, oder durch Drehung des Körpers eine andere Richtung gegen diesen gibt, so ändert sich die Lage des Angriffspunktes der Mittelkraft gegen diejenige der Angriffspunkte der anderen Kräfte nicht im mindesten. Desshalb heisst der Angriffspunkt ihrer Mittelkraft auch der Mittelpunkt der parallelen Seitenkräfte.

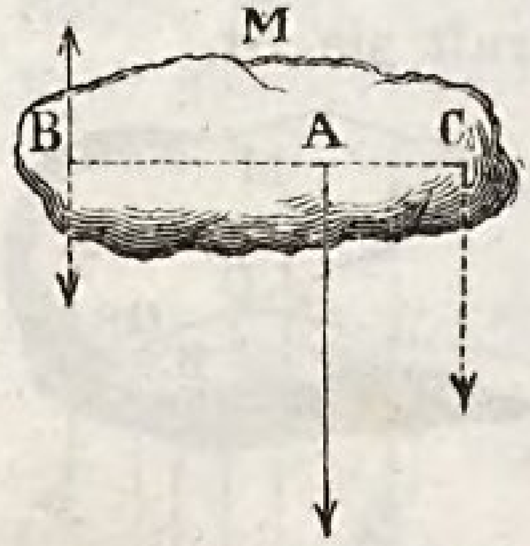


Fig. 44.

§. 47. Wenn auf den Körper M (Fig. 44) zwei parallele, aber in entgegengesetztem Sinne gerichtete Kräfte wirken, eine von 11^k in dem Punkte A, die andere von 4^k in dem Punkte B, so findet man ihre Resultante auf folgende Weise: Man betrachtet die grössere von den beiden Kräften, also hier die von 11^k, wie durch die Zusammensetzung zweier mit ihr paralleler und in demselben Sinn gerichteter Kräfte entstanden. Die eine von diesen Kräften habe eine Grösse von 4^k und greife im Punkte B an. Dann muss die andere eine Grösse von 7^k haben und in einem Punkte C angebracht werden, welchen man leicht dadurch erhält, dass man BA über A hinaus verlängert und in dieser Verlängerung AC so nimmt, dass es sich zu AB verhält, wie 4 zu 7. Wenn man nun die Kraft von 11^k durch die beiden eben gefundenen Seitenkräfte ersetzt, so erhält man in dem Punkte B zwei Kräfte, jede von 4^k, die in entgegengesetztem Sinne wirken, sich also gegenseitig aufheben; es bleibt daher nur noch eine Kraft von 7^k, die in dem Punkte

C angreift, und diese ist offenbar die Mittelkraft der beiden gegebenen Kräfte. Beachtet man nun noch, dass sich die Entfernungen CA und CB des Punktes C von den beiden gegebenen Punkten A und B wie 4 zu 11 verhalten, so kann man aus dem Obigen leicht auf folgenden allgemeinen Satz schliessen: **Zwei parallele, im entgegengesetzten Sinn gerichtete Kräfte, welche an einem festen Körper angreifen, haben eine Mittelkraft, welche gleich ihrer Differenz und parallel zu ihnen, im Sinn der grösseren von beiden gerichtet ist. Der Angriffspunkt dieser Mittelkraft wird erhalten, wenn man die Verbindungslinie der Angriffspunkte der beiden Seitenkräfte über den Angriffspunkt der grössern Kraft hinaus verlängert und in dieser Verlängerung einen Punkt so nimmt, dass sich seine Entfernungen von jenen Angriffspunkten umgekehrt verhalten wie die diesen zugehörigen Seitenkräfte.**

Bezeichnen wieder P und Q die Grössen der beiden parallelen, im entgegengesetzten Sinne gerichteten Kräfte und p und q die Entfernungen AC und BC (Fig. 44) ihrer Angriffspunkte von dem der Mittelkraft R, so bestehen nach obigem Satze folgende Formeln:

$$R = P - Q$$
$$P : Q = q : p$$

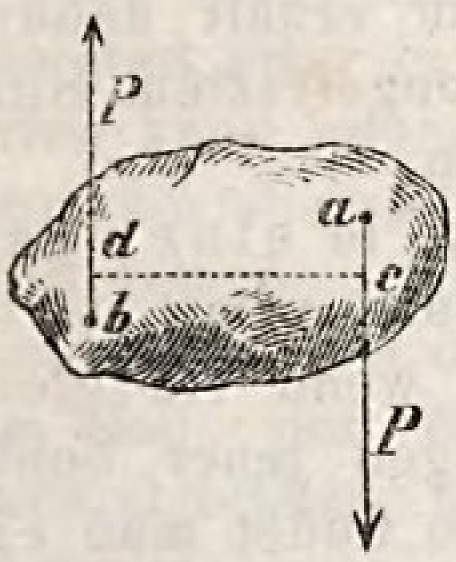


Fig. 45.

§. 48. Wenn die zwei parallelen und in entgegengesetztem Sinne gerichteten Kräfte einander gleich sind (Fig. 45), so findet man nach dem obigen Verfahren keine Mittelkraft für sie. Der erste Theil des obigen Satzes gäbe für ihre Grösse Null. Nach dem zweiten Theil müsste ihr Angriffspunkt in der Verlängerung der Verbindungslinie der Angriffspunkte der beiden Seitenkräfte nach einer durch den Satz unbestimmt gelassenen Seite hin in gleicher Entfernung von jenen Angriffspunkten gelegen sein, was nur annähernd durch Annahme einer sehr, oder besser unendlich grossen Entfernung desselben zu erreichen wäre. Das Wahre an der Sache ist, dass die beiden Kräfte, wie sie hier gegeben sind, überhaupt **nicht in eine einzige vereinigt werden können**. Jede einzelne Kraft sucht ihren Angriffspunkt n ihrer eigenen Richtung geradlinig fortzubewegen. Von zwei gleichen, parallelen und entgegengesetzten Kräften aber sucht die eine die Stelle a des Körpers nach der einen, die andere der Stelle b nach der anderen Seite hin zu treiben, wodurch offen-

bar eine Drehung des Körpers bewirkt wird, die durch eine einzige Kraft nicht hervorgebracht werden kann. Wir stossen hier also auf einen Fall, wo es nicht möglich ist, die Wirkung zweier Kräfte auf einen Körper durch eine einzige Kraft zu ersetzen, obwohl diese Kräfte nicht im Gleichgewicht sind und es ist uns dieser Fall auch desshalb besonders merkwürdig, weil er uns schon jetzt darauf aufmerksam macht, dass es nicht gerade in allen Fällen eine einzige Kraft als Mittelkraft von beliebig vielen gegebenen Kräften geben muss, was sich uns in der Folge bestätigen wird. — Der Kürze halber hat man zwei parallele, in entgegengesetztem Sinne gerichtete, gleiche Kräfte ein Gegenpaar oder besser einen Drehzwilling und die senkrechte Entfernung *cd* (Fig. 45) der Kräfte seinen Arm genannt. Wenn man die Grösse einer der beiden Kräfte mit dem Arm des Drehzwillings multiplicirt, so erhält man das, was man das Drehmoment des Drehzwillings heisst. Zwei Drehzwillinge also, deren Kräfte 8 und 6 Kilogramm gross und deren Arme bez. 3 und 4 Centimeter lang sind, haben gleiche Drehmomente, welche durch die Zahl 24 ausgedrückt werden.

§. **49.** Wenn auf einen Körper beliebig viele parallele Kräfte wirken, von denen ein Theil in einem, der andere im entgegengesetzten Sinn gerichtet ist, so sucht man von jeder dieser beiden Gruppen für sich die Mittelkraft (§. 46). Man erhält dadurch zwei Kräfte, die in parallelen, aber in entgegengesetztem Sinne gehenden Richtungen an dem Körper angreifen.

Liegen die Richtungen dieser beiden Kräfte in einer geraden Linie, so haben sie entweder eine Resultante, wenn sie ungleich sind, oder sie sind im Gleichgewicht, wenn sie gleich gross sind (§. 44). Wenn aber die Richtungen jener beiden Kräfte nicht in einer geraden Linie liegen, so findet man eine Mittelkraft für dieselben nur dann, wenn sie ungleich gross sind (§. 47); im andern Falle bilden sie einen Drehzwilling (§. 48) und können in ihrer Wirkung nicht durch eine einzige Kraft ersetzt werden. Beliebig viele parallele, in verschiedenem Sinne auf einen Körper wirkende Kräfte können also entweder im Gleichgewicht sein, oder sie können in ihrer Wirkung entweder durch eine einzige Mittelkraft, oder nur durch einen Drehzwilling ersetzt werden.

§. 50. **Kräfte, welche nach verschiedenen Richtungen hin an einem und demselben Angriffspunkt wirken; Kräfteparallelogramm.** — Von Kräften, welche in gleichen

oder parallelen Richtungen wirken, gehen wir nun zu solchen über, die nach verschiedenen Richtungen hin thätig sind, zunächst aber an einem und dem nämlichen Punkt angreifen. Zuvörderst ist leicht einzusehen, dass zwei solche Kräfte stets eine Mittelkraft haben müssen. Denken wir uns, dass eine Schnur ACB (Fig. 46) mit ihren beiden Enden an zwei festen Punkten A und B festgemacht sei, und dass man in dem Punkte C mittelst einer anderen Schnur CD ein Gewicht von 10^k aufgehängt habe. Dieses Gewicht wird sich offenbar so stellen, dass die Schnur CD vertikal ist; die Theile AC und BC der ersten Schnur werden gespannt, und ihre Spannungen

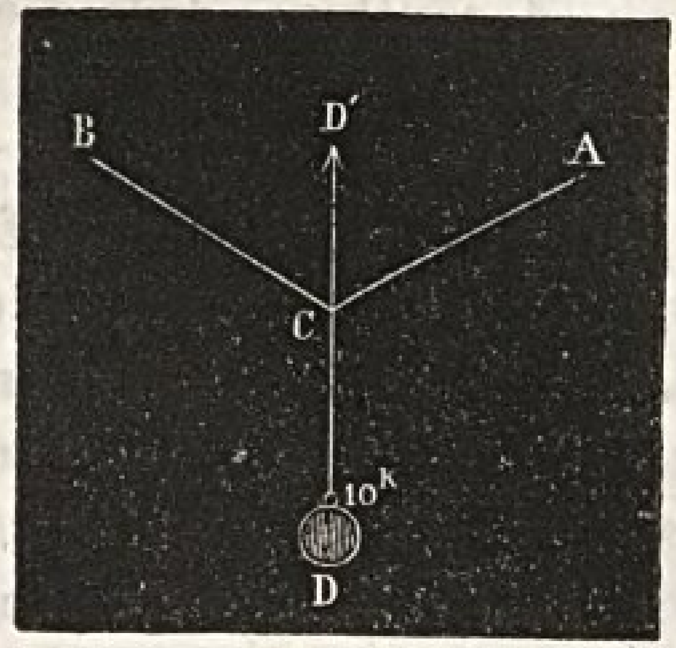


Fig. 46.

können als Kräfte betrachtet werden, welche in dem Punkte C nach den Richtungen CA und CB angreifen und das Gewicht von 10^k im Gleichgewicht halten. Aber dieses Gewicht kann auch durch eine einzige Kraft von 10^k, welche in dem Punkte C vertikal von unten nach oben in der Richtung CD′ wirkt, im Gleichgewicht gehalten werden. Diese letztere Kraft bringt also für sich allein die nämliche Wirkung hervor, wie die nach CA und CB wirkenden Kräfte zusammen, sie ist folglich die Mittelkraft, und man sieht, dass sie, in demselben Punkt angreifend, zwischen ihnen und zwar in der Ebene, welche durch sie hindurch gelegt werden kann, gelegen sein muss, da kein Grund vorhanden ist, warum sie eher auf der einen, als auf der anderen Seite dieser Ebene gelegen sein sollte. Ebenso ist klar, dass die Mittelkraft in dem Falle, wo die nach CA und CB hin thätigen Kräfte gleich gross sind, den Winkel ACB, welchen dieselben im Angriffspunkte C bilden, halbiren muss, da wiederum kein Grund vorhanden ist, warum die Mittelkraft näher an der einen, als an der andern der beiden gleich grossen Kräfte gelegen sein sollte.

§. 51. Es stelle nun die Fig. 47 einen Körper vor, auf welchen zwei in dem Punkte A angreifende Kräfte P und Q von beliebiger Grösse wirken, die ihrer Grösse und Richtung nach durch die beiden geraden Linien AB und AC dargestellt sein sollen. Um die Mittelkraft dieser Kräfte zu

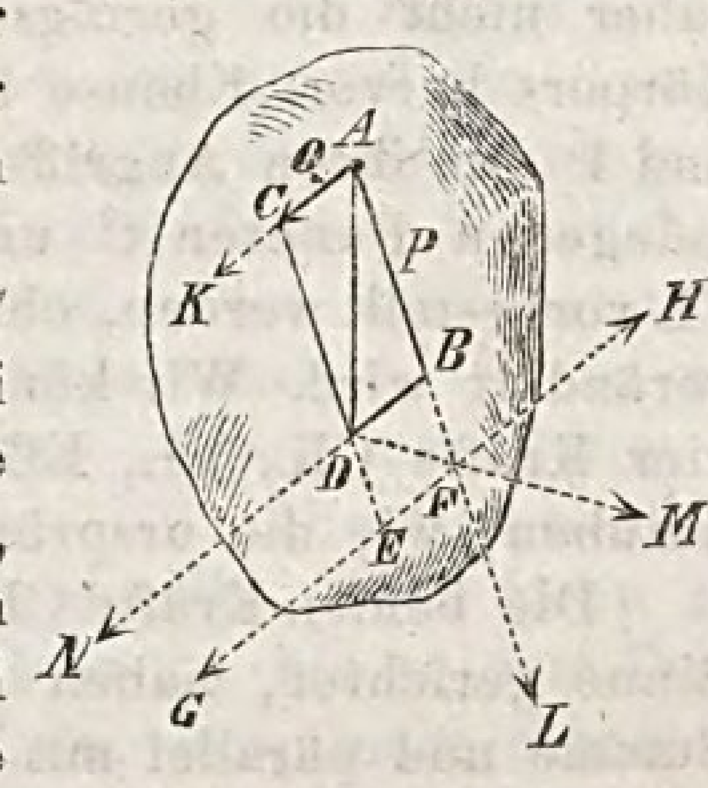


Fig. 47.

finden, construirt man das Parallelogramm ABDC; die Diagonale AD desselben stellt dann diese Mittelkraft der Grösse und Richtung nach vor. Wir theilen den Beweis dieses Satzes in zwei Theile und fangen damit an, darzuthun, dass die Richtung der Mittelkraft der gegebenen Kräfte mit derjenigen der Diagonale AD übereinstimmt.

Zuvörderst sehen wir, dass dies keineswegs dem schon oben gewonnenen Resultat für den Fall zweier gleicher Kräfte widerspricht. Denn wenn die Seiten AC und AB des Parallelogrammes einander gleich werden, so halbirt die Diagonale AD in der That den Winkel, den sie mit einander bilden, und kann daher nach Obigem die Richtung der Mittelkraft vorstellen.

Um dies aber auch für den allgemeineren Fall einer beliebigen Grösse der beiden Kräfte P und Q zu erweisen, reicht es hin, darzuthun, dass es gestattet ist, den Angriffspunkt der Mittelkraft von A nach D zu verlegen. Denn dies ist eben nur dann erlaubt, wenn der Punkt D schon ursprünglich in der Richtung der Mittelkraft liegt, diese also in der That die Richtung der Diagonale hat.

Man verlängere die Seite CD des Parallelogrammes ABDC über D hinaus um die Länge der anderen Seite DB, so dass also DE gleich DB wird, und vollende über den Linien DB und DE das Parallelogramm DEFB, das ein gleichseitiges, d. h. ein solches wird, dessen sämmtliche vier Seiten gleich gross sind. Seine Diagonale DF halbirt folglich die Winkel bei D und F, durch welche sie geht. In den Punkten F und E bringe man nun zwei, der Kraft P gleiche, aber in der Richtung der Linie EF einander gerade entgegengesetzte Kräfte an, die durch die Linie FH und EG, gleich der AB, vorgestellt seien. Diese beiden Kräfte halten sich selber das Gleichgewicht und bringen daher nicht die geringste Veränderung in dem Zustande des Körpers hervor. Ebenso können die beiden gegebenen Kräfte Q und P mit ihren Angriffspunkten nach den in ihren Richtungen gelegenen Punkten C und F verlegt und bez. durch CK und FL vorgestellt werden, ohne dass in ihrer Wirkung das Geringste verändert wird. Wir können uns also überzeugt halten, dass die vier Kräfte CK, FL, EG und FH genau die nämliche Wirkung ausüben, wie die ursprünglichen zwei Kräfte AB und AC.

Die beiden Kräfte CK und EG sind parallel und im gleichen Sinne gerichtet, haben daher eine Mittelkraft DN gleich ihrer Summe und parallel mit ihnen, deren Angriffspunkt auf der Verbindungslinie CE ihrer Angriffspunkte so gelegen ist, dass sich

seine Entfernungen von letzteren umgekehrt verhalten, wie die an ihnen thätigen Kräfte. Dieser Punkt ist aber kein anderer als der Punkt D, da ja CD und DE bez. gleich AB und DB oder EG und CK sind. Die Mittelkraft der beiden Kräfte CK und EG hat also ihren Angriffspunkt in D. — Die beiden Kräfte FH und FL sind gleich gross. Ihre Mittelkraft, zunächst ebenfalls in F angreifend, muss folglich den Winkel, den sie bei F mit einander bilden, halbiren, und daher ihre Richtung die Verlängerung von DF bilden. Daraus folgt aber, dass sie mit ihrem Angriffspunkt gleichfalls nach D verlegt werden kann, wo schon die Mittelkraft der beiden anderen Kräfte wirkt, sodass sie also mit dieser wieder eine Mittelkraft ergibt, die ihren Angriffspunkt in D hat. Diese letztere Mittelkraft, diejenige der vier Kräfte CK, EG, FL und FH, ist keine andere, als die der ursprünglichen Kräfte P und Q, von der wir somit nachgewiesen haben, dass sie durch die vorgenommenen Manipulationen, die aber alle unbeschadet der Wirkung der Kräfte geschehen konnten, mit ihrem Angriffspunkt nach D verlegt werden kann. D muss also schon ursprünglich ein Punkt in ihrer Richtung sein, und sie kann somit keine andere Richtung als die der Diagonale AD des Parallelogramms ABDC haben.

Gehen wir nun zu dem zweiten Theil des am Anfang dieses §. aufgestellten Satzes über, zu der Behauptung nämlich, dass die Resultante der beiden Kräfte AB und AC auch der Grösse nach durch die Diagonale AD dargestellt wird. Dabei bemerken wir zunächst, dass, wenn die Richtung von zwei Kräften, welche an einem Punkt angreifen, die Richtung ihrer Resultante und die Grösse der einen Seitenkraft gegeben ist, die Grösse der andern Seitenkraft durch das Vorhergehende gefunden werden kann. Es sei ACB (Fig. 48) eine Schnur, deren eines Ende in dem Punkte A festgemacht ist, während an dem andern Ende B gezogen wird; in dem Punkte C dieser Schnur sei ein Gewicht aufgehängt, und die Zugkraft, die in dem Punkte B ausgeübt wird, um dieses Gewicht im Gleichgewicht zu halten, werde durch ein Dynamometer gemessen. Nun weiss man, dass die Spannungen der Schnurtheile CA und CB eine Resultante haben, welche nach der Vertikalen CE gerichtet ist; ebenso kennt man durch das Dynamometer die Spannung der Schnur CB. Die Grösse dieser Spannung sei durch die Linie CF dargestellt. Man ziehe nun durch den Punkt F eine Parallele FH zu CA bis zu dem Punkt H, wo diese Parallele die Richtung CE der Resultante schneidet; alsdann ziehe man durch den Punkt H eine Parallele HG zu BC

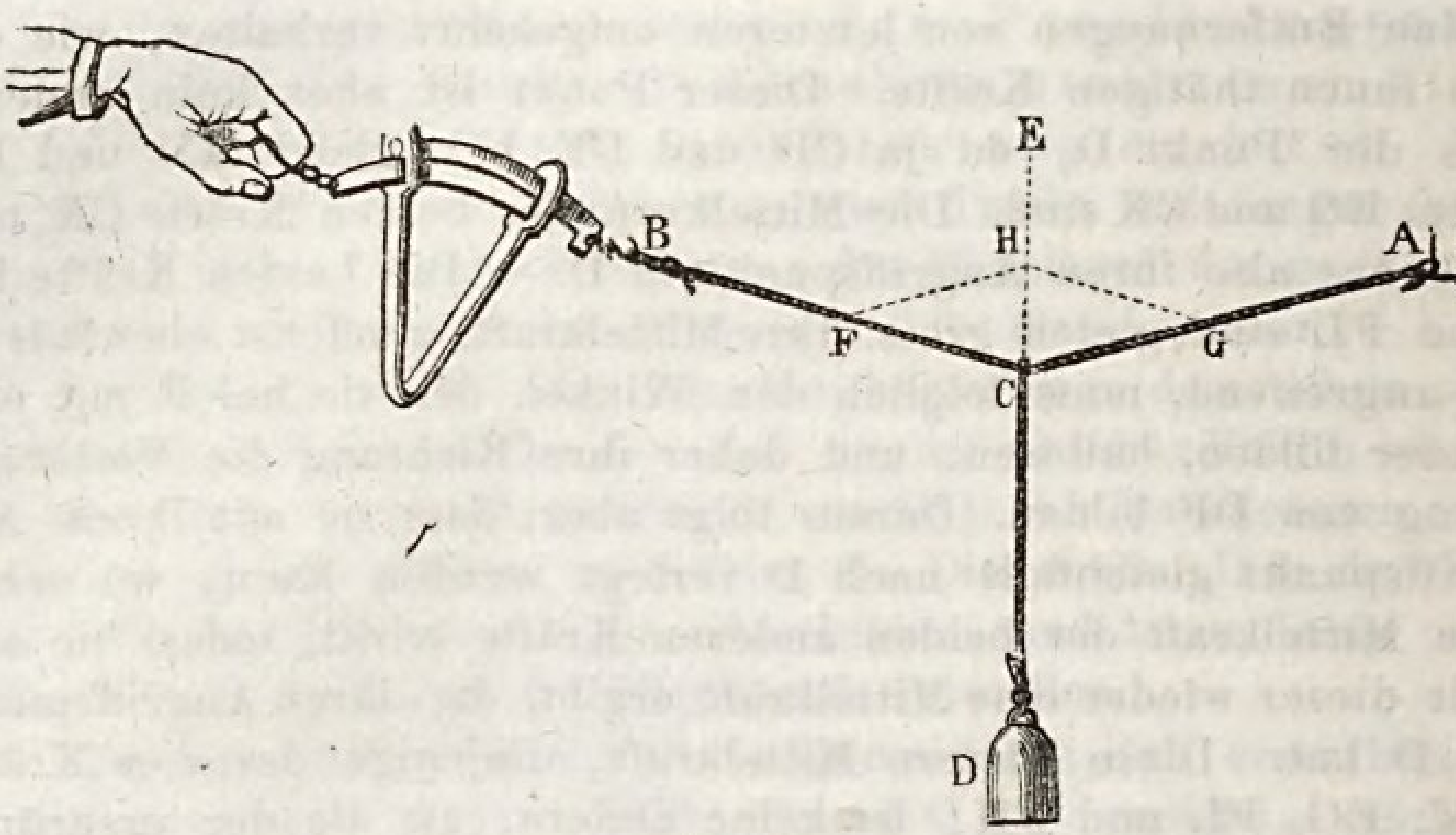


Fig. 48.

so stellt die Länge CG die Grösse der Spannung des Schnurtheiles AC vor. Denn wäre dies nicht so, würde diese Spannung durch eine grössere oder kleinere Länge als CG repräsentirt, so wäre die in der Richtung CE wirkende Mittelkraft nicht nach der Diagonale des Parallelogrammes gerichtet, das über den beiden Linien construirt wird, durch welche die Seitenkräfte dargestellt werden.

Wenn auf einen Körper M (Fig. 49) zwei Kräfte AB, AC wirken, so haben diese beiden Kräfte eine Mittelkraft, welche, wie oben gezeigt wurde, nach der Diagonale AD des Parallelogrammes ABDC gerichtet ist. Wenn wir also an dem Körper in der Richtung AF eine der Mittelkraft gleiche, aber ihr gerade entgegengesetzte Kraft anbringen, so hält diese der Resultante das Gleichgewicht, und ist folglich auch im Stande, die Seitenkräfte im Gleichgewichte zu halten. Es befindet sich dann der Körper M unter der Wirkung der beiden Kräfte AB und AC und einer dritten Kraft, welche in der Richtung von AN wirkt, und deren Grösse gleich derjenigen der gesuchten Mittelkraft ist, im Gleichgewicht.

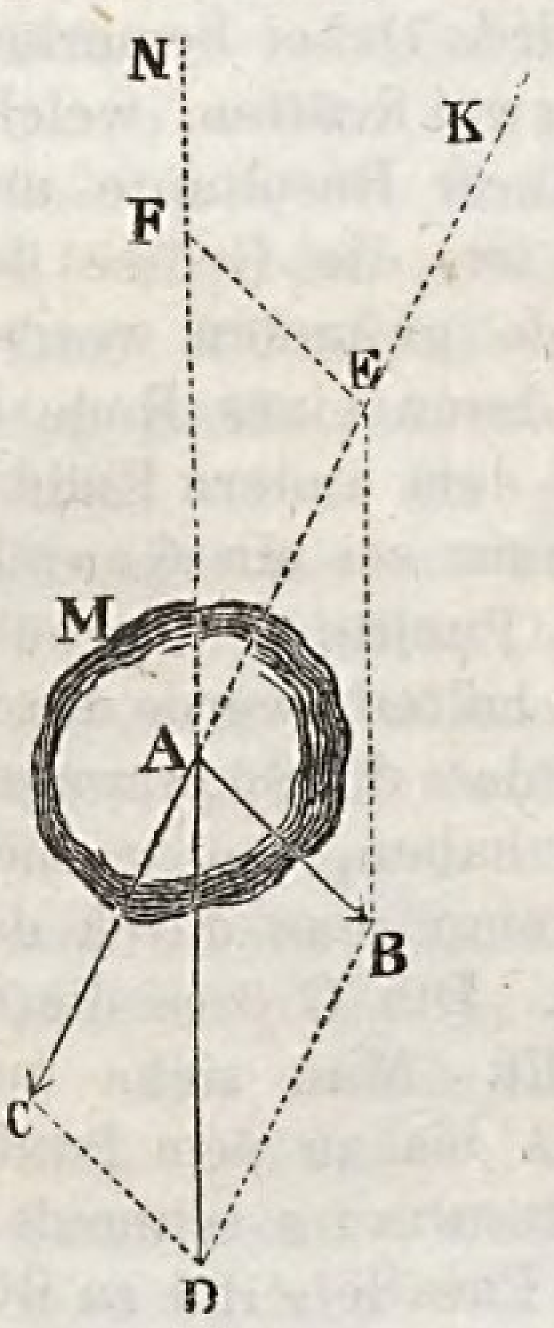


Fig. 49.

Die eine von diesen drei Kräften, AC, hält also den beiden andern und somit auch der Mittelkraft derselben, das Gleichgewicht; es muss also die Resultante der Kraft AB und derjenigen Kraft, welche nach AN wirkt,

nach der Linie AK, der Verlängerung von AC, gerichtet sein. Wir kennen somit die Richtungen AB und AN zweier Kräfte, die Richtung AK ihrer Resultante und die Grösse AB der einen von ihnen, und können daher, wie oben gezeigt wurde, die Grösse der in der Richtung von AN wirkenden zweiten Seitenkraft bestimmen. Zu diesem Behufe ziehen wir durch den Punkt B eine Parallele BE zu AN, bis die Linie AK in E geschnitten wird; hierauf ziehen wir durch den Punkt E eine Parallele zu AB, bis AN in F geschnitten wird, so repräsentirt die so erhaltene Länge AF die Grösse der nach dieser Linie wirkenden Kraft, und also auch die Grösse der Resultante, welche wir suchen, weil diese der Kraft AF gleich und entgegengesetzt ist. Nun ist ABEF ein Parallelogramm, also AF gleich BE; ebenso ist ADBE ein Parallelogramm, und daher die Seite BE gleich der Seite AD; also ist AD gleich AF, und daraus folgt, dass die Diagonale AD auch der *Grösse* nach die Mittelkraft der beiden Kräfte AB und AC vorstellt.

Der oben aufgestellte Satz ist somit erwiesen: *Die Resultante von zwei in dem nämlichen Punkte eines Körpers angreifenden Kräften, welche nach verschiedenen Richtungen hin wirken, wird ihrer Grösse und Richtung nach durch die Diagonale des Parallelogramms dargestellt, welches man über den geraden Linien construirt, durch welche die Seitenkräfte repräsentirt werden.* Dieser Satz wird gewöhnlich kurz als der Satz vom *Parallelogramm der Kräfte* bezeichnet.

§. 52. Es kommt häufig vor, dass eine Kraft durch zwei andere, in demselben Punkt angreifende Kräfte ersetzt werden soll, deren Resultante sie ist; man nennt dies das Zerlegen der gegebenen Kraft in zwei Seitenkräfte. Diese Zerlegung kann mittelst des Parallelogrammes der Kräfte leicht ausgeführt werden. Man darf nur ein Parallelogramm zeichnen, dessen Diagonale die Linie AB (Fig. 50) ist, durch welche die gegebene Kraft der Grösse und Richtung nach dargestellt wird. Da aber durch seine Diagonale allein das Parallelogramm noch keineswegs bestimmt ist, so kann man un-

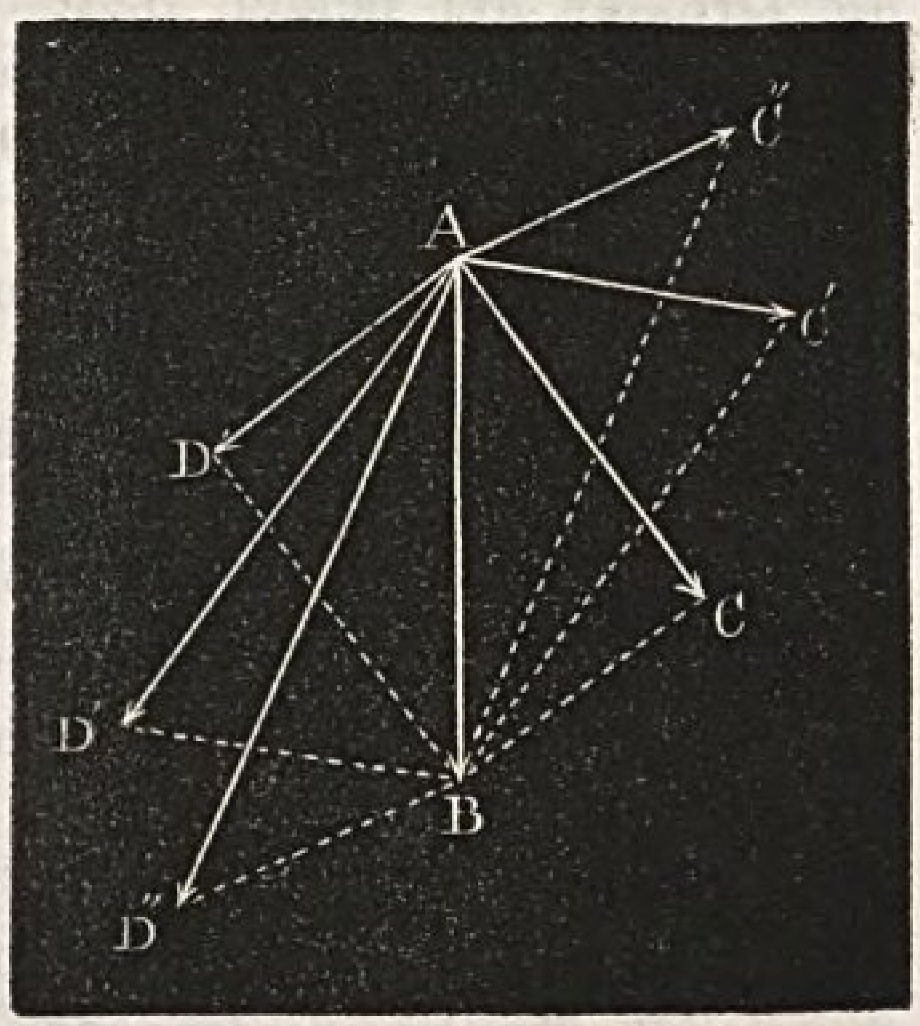


Fig. 50.

endlich viele Parallelogramme zeichnen, welche der Aufgabe sämmtlich genügen, und von denen jedes ein paar Seitenkräfte liefert, die die gegebene Kraft zur Mittelkraft haben. Einige von diesen Parallelogrammen sind in Fig. 50 angedeutet, und ihnen entsprechen die Kräftepaare AC und AD, AC′ und AD′, AC″ und AD″, welche alle die obige Bedingung erfüllen. Aus dieser Unbestimmtheit unserer Aufgabe geht hervor, dass über die zu suchenden Seitenkräfte noch willkürliche Bestimmungen getroffen werden können. Man kann in dieser Beziehung folgende drei Fälle unterscheiden: 1) Es sind die Richtungen AC und AD (Fig. 51) der beiden Seitenkräfte, in welche die der Grösse und Richtung nach durch die gerade Linie AB dargestellte Kraft zerlegt werden soll, gegeben. Man ziehe durch den Punkt B die Linie BE parallel zu AD und die Linie BF parallel zu AC, so erhält man die Linien AE und AF, welche die Grösse der gesuchten Seitenkräfte repräsentiren. 2) Die eine der Seitenkräfte, AE, in welche die gegebene Kraft AB zerlegt werden soll, ist der Grösse und Richtung nach gegeben. Man ziehe die Linie BE und vollende hierauf das Parallelogramm AEBF, indem man AD parallel zu BE und BF parallel zu AE zieht, so stellt die so erhaltene Linie AF die zweite Seitenkraft der Grösse und Richtung nach vor. 3) Es sind die Grössen der beiden Seitenkräfte gegeben, in welche die gegebene Kraft AB zerlegt werden soll; gesucht also ihre Richtungen. Man construire über AB das Dreieck AEB so, dass die Seite AE gleich der einen, die Seite BE gleich der andern der beiden gegebenen Seitenkräfte ist; hierauf vollende man das Parallelogramm AEBF, so sind AE und AF die gesuchten Richtungen der beiden Seitenkräfte, deren Grössen offenbar zugleich durch die Linie AE und AF dargestellt sind.

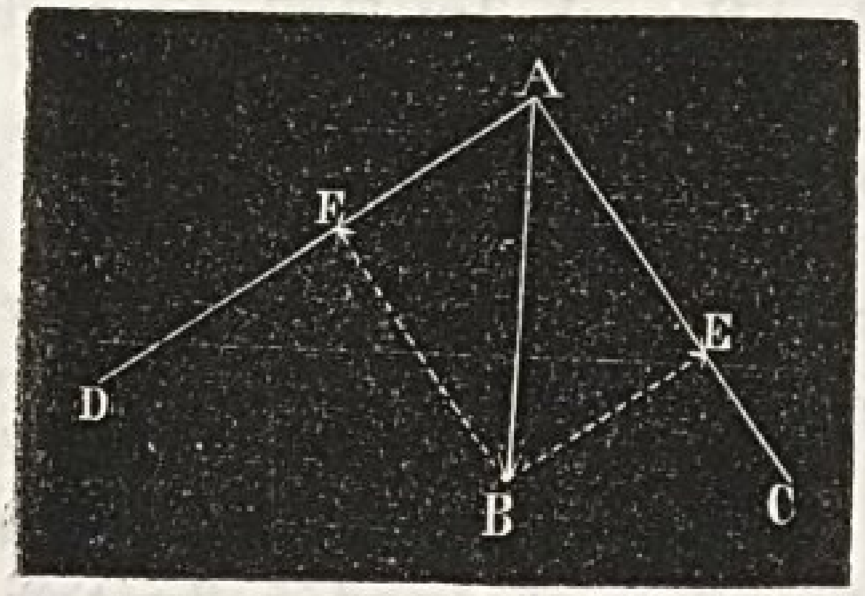


Fig. 51.

Da für jede der beiden Seitenkräfte, in welche man eine gegebene Kraft zerlegen kann, durch Anwendung desselben Verfahrens zwei neue Seitenkräfte erhalten werden können, deren Mittelkraft sie ist, so ist klar, dass man durch Wiederholung des beschriebenen Verfahrens jede gegebene Kraft in eine beliebige Anzahl von Seitenkräften, deren Resultante sie ist, zerlegen kann.

§. 53. Wenn ein Körper der Wirkung von mehr als zwei Kräften MP_1, MP_2, MP_3, MP_4 (Fig. 52) unterworfen ist, welche

alle an dem nämlichen Punkte nach verschiedenen Richtungen hin wirken, so findet man die Mittelkraft aller dieser Kräfte auf folgende Art: Man setzt zuerst zwei von den gegebenen Kräften MP_1, MP_2 in eine einzige Mittelkraft MQ zusammen; diese erste Mittelkraft vereinigt man dann mit einer dritten MP_3 der gegebenen Kräfte, die neue Mittelkraft MR mit einer vierten, und so fährt man fort, bis man nach und nach alle Kräfte in eine einzige zusammengesetzt hat, welche die Mittelkraft sämmtlicher gegebenen Kräfte ist. Dabei mag es gut sein, darauf aufmerksam zu machen, dass es für das beschriebene Verfahren nicht nothwendig ist, dass sämmtliche Kräfte, wie hier gezeichnet, in einer Ebene liegen. Da sich alle in dem nämlichen Punkte M schneiden, so lässt sich stets durch je zwei, oder durch eine und die Mittelkraft von anderen eine Ebene hindurch legen, in der das Parallelogramm construirt werden kann.

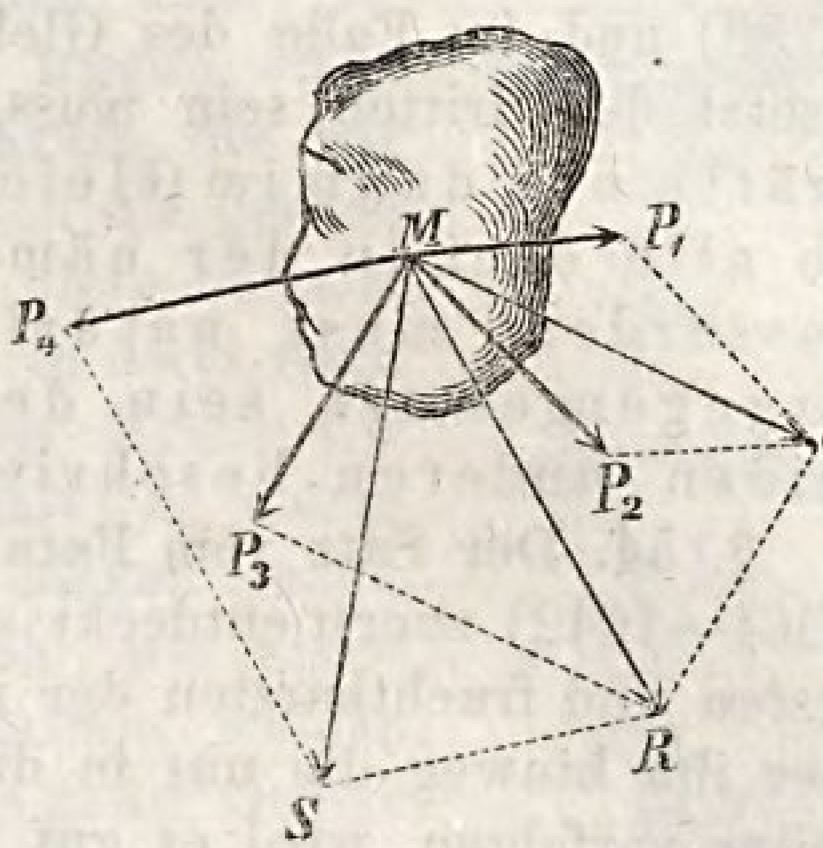


Fig. 52.

Wenn die gegebenen Kräfte im Gleichgewicht sein sollen, so ist klar, dass ihre Mittelkraft gleich Null sein muss; denn so lange diese Mittelkraft irgend einen Werth hat, heben sich die Kräfte nicht auf, sondern üben eine Wirkung auf den Körper aus, welche jenem Werthe der Mittelkraft entspricht. Wenn man aber das oben angegebene Verfahren zur Auffindung der Mittelkraft aufmerksam verfolgt, so sieht man leicht, dass diese Mittelkraft nur dann Null wird, wenn die Mittelkraft aus allen Kräften, mit Ausnahme der letzten, mit dieser letzten im Gleichgewicht, also ihr gleich und entgegengesetzt ist. Daraus folgt: Beliebig viele, an dem nämlichen Punkt eines Körpers nach verschiedenen Richtungen hin wirkende Kräfte sind im Gleichgewicht, wenn ihre Mittelkraft gleich Null ist, oder wenn die Mittelkraft aus allen, mit Ausnahme einer, gleich und entgegengesetzt dieser einen ist.

Von besonderer Wichtigkeit ist hier der einfache Fall, wo nur drei Kräfte an dem nämlichen Punkt eines Körpers nach verschiedenen Richtungen hin wirken. Da die Mittelkraft irgend zweier dieser Kräfte in der Ebene dieser Kräfte gelegen ist

(§. 50) und im Falle des Gleichgewichts gleich und entgegengesetzt der dritten sein muss, so ist klar, das solche drei Kräfte nur dann im Gleichgewicht sein können, wenn sie alle drei in der nämlichen Ebene gelegen sind. Ausserdem muss natürlich jede Kraft gleich und entgegengesetzt sein der Diagonale des über den beiden anderen beschriebenen Parallelogramms.

§. 54. Der Satz vom Parallelogramm der Kräfte, von *Galilei* (1564—1642) zuerst entdeckt und angewandt, ist einer der wichtigsten und fruchtbarsten der ganzen Mechanik. Bevor wir daher über ihn hinweg die uns in diesem Abschnitt gesteckte Aufgabe weiter verfolgen, wird es gut sein, an ein paar Beispielen seine Anwendung zu erläutern.

1) Als erstes Beispiel wählen wir den schon in §. 50 erwähnten Fall, wo ein schwerer Körper D (Fig. 46, S. 79) mittelst einer Schnur an einer zweiten, in den Punkten A und B befestigten Schnur ACB aufgehängt ist. Die erstere Schnur richtet sich unter der Wirkung des aufgehängten Gewichtes jedenfalls vertikal und es kann daher dieses Gewicht als eine, in dem Punkte C angreifende, vertikal abwärts wirkende Kraft der Grösse und Richtung nach durch eine gerade Linie CD (Fig. 53) vorgestellt werden. Dieser Kraft wird durch die Spannungen der Schnurtheile AC und CB, die wir uns in den Richtungen CA und CB wirkend denken müssen, das Gleichgewicht gehalten. Es haben daher jene Spannungen die nämliche Wirkung wie die der Kraft CD gleiche und entgegengesetzte Kraft CD'; letztere ist also die Mittelkraft der ersteren. Construirt man daher ein Parallelogramm CED'F, dessen Diagonale jenes CD' ist, und dessen Seiten auf CA und CB liegen, so bezeichnen diese Seiten CE, CF der Grösse und Richtung nach die Spannungen in den Schnurtheilen CA und CB, welche sich in Folge des aufgehängten Gewichtes geltend machen.

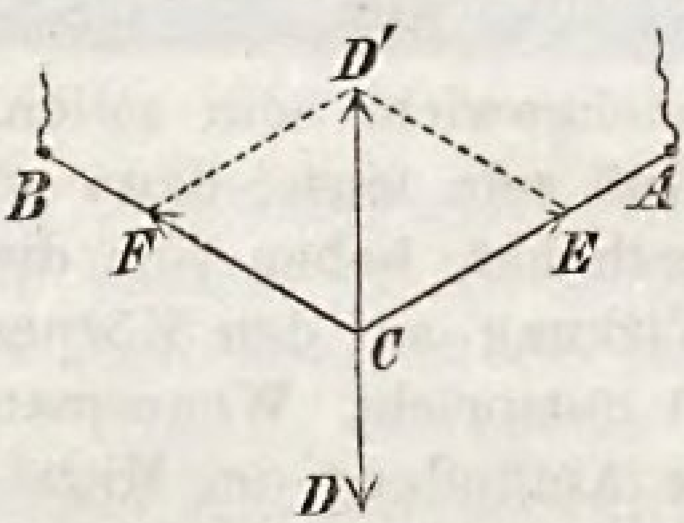


Fig. 53.

2) Als zweites Beispiel nehmen wir die sogenannte Kniepresse, welche als Siegel-, Münz- oder Buchdruckerpresse häufig angewendet wird. Dieselbe besteht im Wesentlichen aus den beiden Stücken AC und CB (Fig. 54), welche einerseits in C mit einander, andererseits oben in A mit einer festen Platte M, unten in B mit einem beweglichen Stück N, der Pressplatte oder dem

Prägstock, durch Gelenke verbunden sind. In der Verbindungsstelle C wirkt in irgend einer Weise eine nahezu horizontale Kraft, die wir der Grösse und Richtung nach durch die gerade Linie CK vorstellen. Zerlegen wir diese mittelst des Kräfteparallelogramms CEKD in zwei nach den Richtungen CA und CB thätige Kräfte CD und CE, so sieht man, wie die Kraft CK, indem sie das Knie ACB einwärts zu ziehen sucht, gegen die obere feste Platte M sowohl, wie gegen die Pressplatte N Drückungen ausübt, welche durch die geraden Linien CD und CE der Grösse und Richtung nach vorgestellt werden. Diese Drückungen werden offenbar um so grösser im Verhältniss zur angewandten Kraft CK, je stumpfer der Winkel ACB ist, und es ist hiernach leicht einzusehen, wie durch eine verhältnissmässig kleine Kraft CK ein grosser Druck gegen die Pressplatte N und damit auch gegen den zu pressenden Körper hervorgebracht werden kann. — Eine ähnliche Einrichtung besitzen die Pressen zum Stempeln der Eisenbahnkarten. Nur wird hier die zu stempelnde Karte bei dem Gelenk C in der Richtung von C nach K eingeschoben und dadurch zugleich der nöthige Druck hervorgebracht.

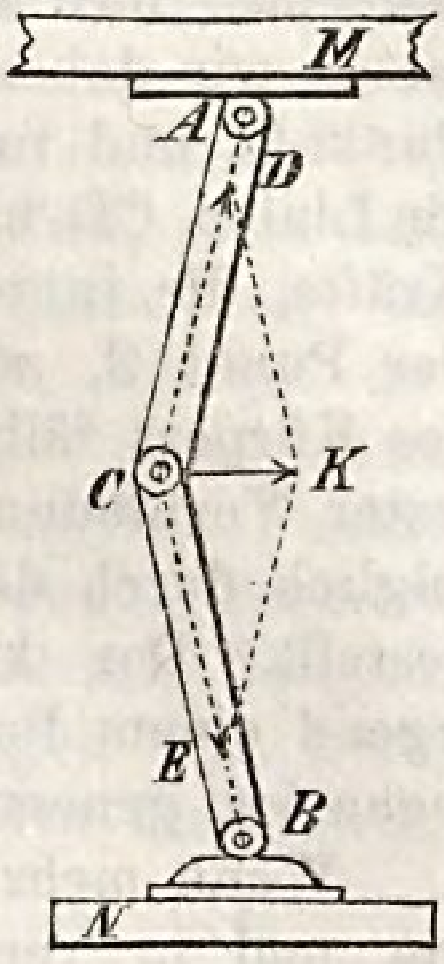


Fig. 54.

§. 55. **Kräfte, welche nach verschiedenen Richtungen hin an verschiedenen Stellen eines festen Körpers wirken.** — Wir haben bisher vorausgesetzt, dass die Kräfte, welche nach verschiedenen Richtungen hin auf einen Körper wirken, ihren Angriffspunkt in einem und dem nämlichen Punkt desselben haben. Es bleibt uns nun noch der allgemeinste Fall übrig, wo Kräfte nach beliebigen Richtungen hin und zugleich an verschiedenen Stellen eines Körpers wirken.

Gehen wir auch hier wieder zunächst von dem einfachen Fall aus, wo blos zwei Kräfte P und Q (Fig. 55) in den Punkten A und B an einen Körper thätig sind, und wo diese Kräfte in einer Ebene liegen, sodass sie sich, wenn nöthig gehörig verlängert, in einem Punkte C schneiden. Nun kann man den Angriffspunkt einer Kraft in ihrer eigenen Richtung beliebig verlegen,

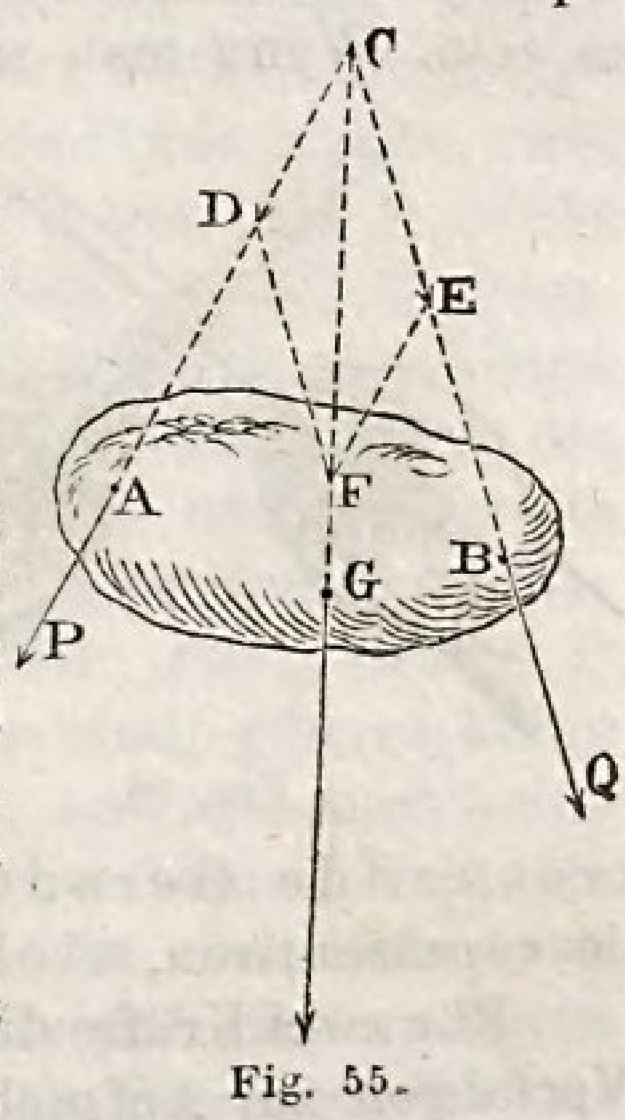


Fig. 55.

ohne dass ihre Wirkung auf den Körper eine andere wird. Versetzen wir daher die Angriffspunkte unserer beiden Kräfte in den Punkt C, und tragen von diesem Punkt aus die lezteren als durch die Linien CD und CE repräsentirt auf, so haben wir jetzt zwei Kräfte, die in einem Punkt C an dem Körper angreifen (wenn der Punkt C, wie im Fall unserer Figur, nicht mehr innerhalb des Körpers fällt, so darf man sich ihn nur mit dem Körper in fester Verbindung denken). Die Mittelkraft dieser Kräfte wird folglich durch die Diagonale CF des Parallelogramms CDFE vorgestellt. Der Angriffspunkt derselben kann natürlich auch in irgend einem Punkt G des Körpers, der in ihrer Richtung gelegen ist, genommen werden.

Wenn mehr als zwei Kräfte nach verschiedenen Richtungen hin und in verschiedenen Punkten auf einen Körper wirken, aber sämmtlich in derselben Ebene gelegen sind, so ist klar, dass man durch Wiederholung des eben angegebenen Verfahrens zuerst die Mittelkraft zweier derselben, alsdann die Resultante zwischen dieser und der dritten Kraft u. s. w. finden kann.

In dem Fall, wo die Richtungen sämmtlicher Kräfte nicht in der nämlichen Ebene liegen, aber verlängert durch einen und den nämlichen Punkt hindurch gehen, kann man alle ihre Angriffspunkte in diesen Punkt verlegen, und gelangt dann wie in §. 53 durch wiederholte Construction des Kräfteparallelogramms zu der Mittelkraft dieser Kräfte.

§. **56.** Aber zwei gerade Linien, dnrch welche wir die Kräfte immer repräsentiren, müssen, wenn auch verlängert, nicht nothwendig sich schneiden und brauchen darum noch nicht parallel zu sein. Wenn man sich zwei gerade Linien durch zwei Bleistifte vorgestellt denkt und letztere so hält, wie es die Fig. 56 andeutet, so hat man ein Beispiel für den in Rede stehenden Fall. Es ist nicht möglich, durch zwei solche gerade Linien eine Ebene hindurch zu legen; wäre dies möglich, so müssten sie sich, verlängert, schneiden, oder sie müssten parallel sein.

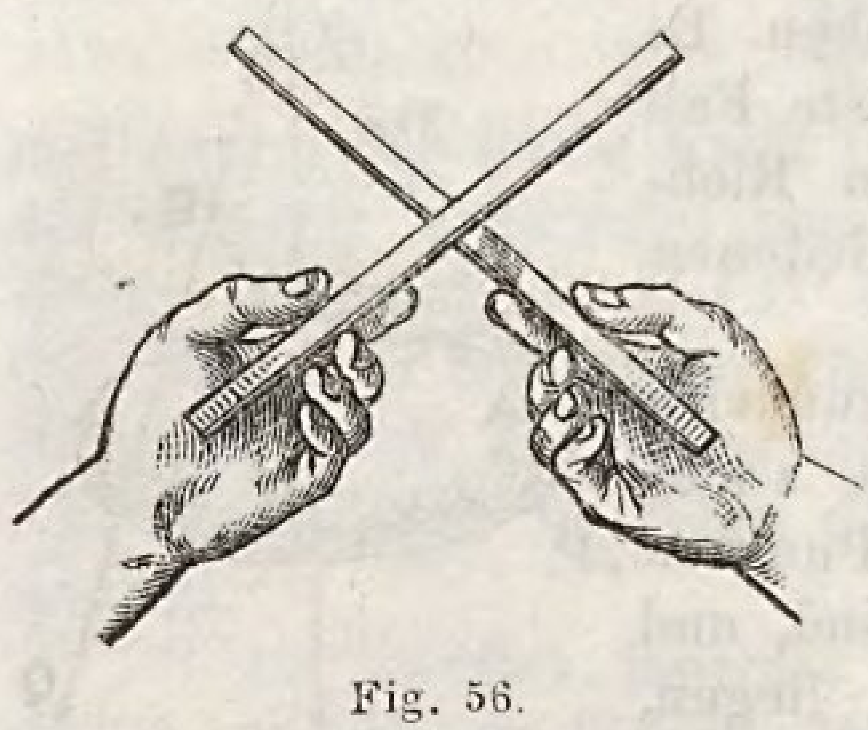


Fig. 56.

Man nennt solche zwei Linien *sich kreuzende Gerade*, und in Folge dessen die Kräfte, welche sie repräsentiren, *sich kreuzende Kräfte*.

Für zwei Kräfte dieser Art lässt sich das im vorigen §. gelehrte Verfahren zur Aufsuchung der Resultante nicht mehr anwenden,

weil man keinen Schnittpunkt mehr findet. Es lässt sich im Gegentheil nachweisen, dass sich zwei solche Kräfte überhaupt nicht mehr durch eine Mittelkraft ersetzen lassen. Denn gesetzt, dies wäre der Fall, so müsste eine Kraft, gleich und entgegengesetzt dieser Mittelkraft, an dem Körper angebracht, den beiden gegebenen Kräften das Gleichgewicht halten können. Nun lässt sich aber nachweisen, dass, wie oben drei Kräfte, die in einem und demselben Punkte angreifen, nun auch drei Kräfte, die in verschiedenen Punkten des Körpers angreifen, nur dann im Gleichgewicht sein können, wenn sie sämmtlich in der nämlichen Ebene gelegen sind. Denn es seien P, Q, R (Fig. 57) drei Kräfte, die, in den Punkten A, B, C angreifend, im Gleichgewicht sind, so ist klar, dass dieses Gleichgewicht nur durch die feste Verbindung, welche zwischen den drei Punkten A, B, C stattfindet, möglich, dass es aber von der Art und Weise dieser Verbindung unabhängig ist. Wir können uns offenbar den Körper ganz weg- und jene drei Punkte nur durch starre gerade Linien AB, BC, AC verbunden denken, ohne dass dadurch das Gleichgewicht gestört wird. In diesem Fall ist aber klar, dass diese drei Linien Spannungen unterworfen sind, welche die Kräfte P, Q, R verhindern, ihren Angriffspunkten mit sich fortzuführen. Daraus folgt, dass es eigentlich z. B. die Spannungen in AC und AB sind, welche die Kraft P im Gleichgewicht halten, was nach den vorhergehenden Paragraphen nur möglich ist, wenn P mit diesen zwei Spannungen und folglich mit den Linien AB und AC in einer Ebene, in der Ebene der drei Angriffspunkte A, B, C liegt. Ganz so lässt sich nachweisen, dass auch Q und R in der Ebene des Dreiecks ABC gelegen sein müssen. Es können daher die drei Kräfte P, Q, R nur dann im Gleichgewicht sein, wenn sie in einer Ebene, in derjenigen, welche durch ihre drei Angriffspunkte gelegt werden kann, liegen. — Für zwei Kräfte P und Q, welche nicht in einer Ebene gelegen sind, gibt es keine Kraft R, die ihnen das Gleichgewicht halten, und also auch keine Mittelkraft, die sie in ihrer Wirkung ersetzen kann. Dass die beiden Kräfte aber auch nicht im Gleichgewicht sind, sieht man auf den ersten Blick, und wir stossen somit hier auf einen zweiten Fall (vergl. §. 48), wo zwei Kräfte, ohne im Gleichgewicht zu

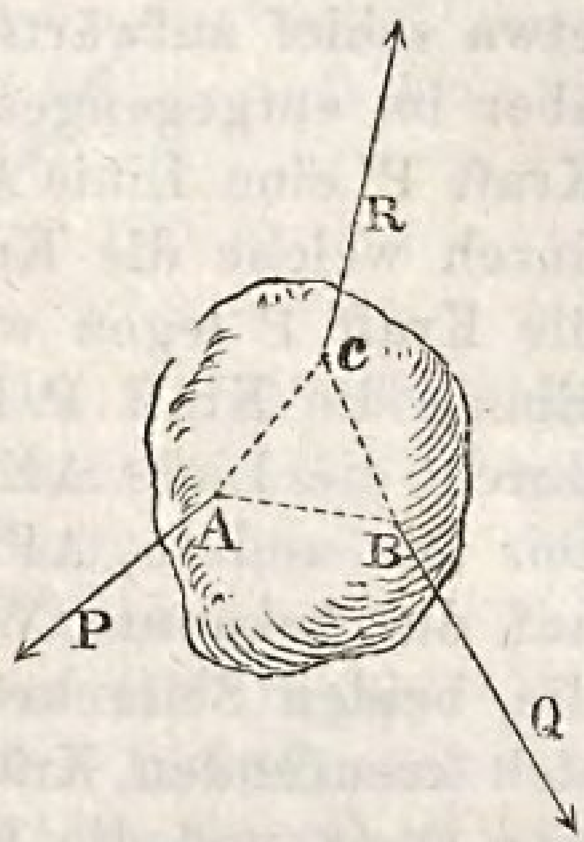


Fig. 57.

sein, in ihrer Wirkung nicht durch eine einzige Resultante ersetzt werden können. Dieser zweite Fall ist von dem ersten offenbar verschieden. Eigentlich ist jener erste nur ein specieller Fall von ihm, wie sich aus der folgenden Betrachtung ergibt:

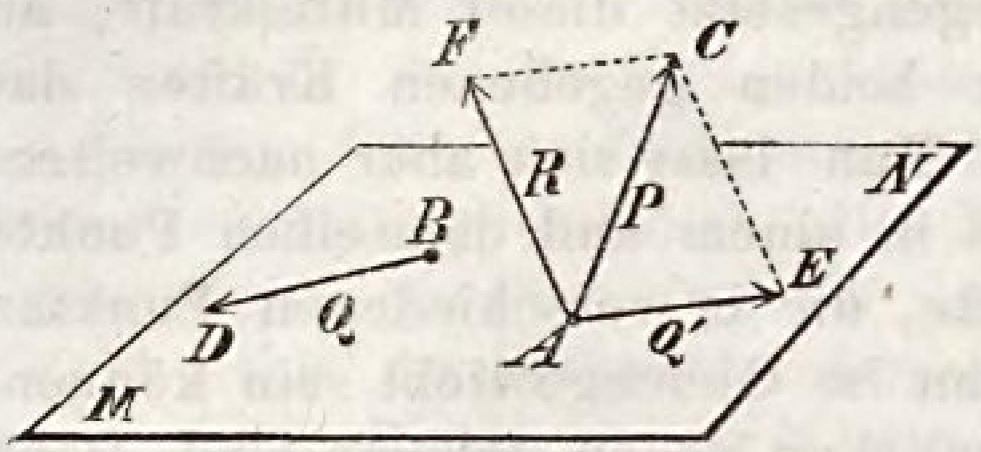


Fig. 58.

Es seien P und Q (Fig. 58) zwei sich kreuzende Kräfte, also zwar die eine, Q, in der Ebene MN, in welche zugleich die beiden Angriffspunkte A und B fallen mögen, gelegen, die andere, P, aber gehe aus dieser Ebene heraus, etwa schief aufwärts. Wir ziehen in der Ebene MN parallel mit Q, aber im entgegengesetzten Sinne, durch den Angriffspunkt A der Kraft P eine Linie AE und machen diese gleich derjenigen BD, durch welche die Kraft Q vorgestellt ist. Durch diese Linie und die Kraft P legen wir nun eine Ebene, und zerlegen in dieser Ebene die Kraft P in zwei Seitenkräfte, von denen die eine, Q′, durch die Linie AE der Grösse und Richtung nach vorgestellt sei. Die andere, AF oder R, gibt das Parallelogramm der Kräfte auf die bekannte Weise. Ersetzen wir nun die Kraft P durch die beiden Seitenkräfte Q′ und R, so haben wir statt der zwei sich kreuzenden Kräfte drei, R, Q und Q′, oder den Drehzwilling Q, Q′ und die Kraft R. Der Drehzwilling sucht den Körper zu drehen; zugleich aber ist die Kraft R bestrebt, den Punkt A in ihrer eigenen Richtung fortzuführen. Zwei sich kreuzende Kräfte haben also nicht blos die Wirkung eines Drehzwillings, sondern es kommt hiezu noch die Wirkung einer dritten Kraft, welche einen der Angriffspunkte desselben in gerader Richtung fortzuführen sucht; und diese dritte Kraft lässt sich aus den ursprünglich gegebenen beiden sehr leicht direct finden. Verlegt man in den Angriffspunkt A der einen von diesen die andere Q so, dass sie sich gleich und parallel bleibt, so ist R die Mittelkraft aus P und der in denselben Angriffspunkt verlegten Kraft Q.

Aber es lässt sich noch eine andere, für die nachfolgenden Untersuchungen wichtigere Eigenschaft eines Paars sich kreuzender Kräfte nachweisen. Es kann dasselbe nämlich, ohne dass seine Wirkung auf den Körper sich ändert, in gewisser Weise so in dem Körper, auf welchen es wirkt, verlegt werden, dass der Angriffspunkt der einen seiner Kräfte ein willkürlicher, zum Voraus bestimmter Punkt wird. Seien P und Q (Fig. 59) zwei sich kreuzende Kräfte, dargestellt durch die Linien AP und BQ, A

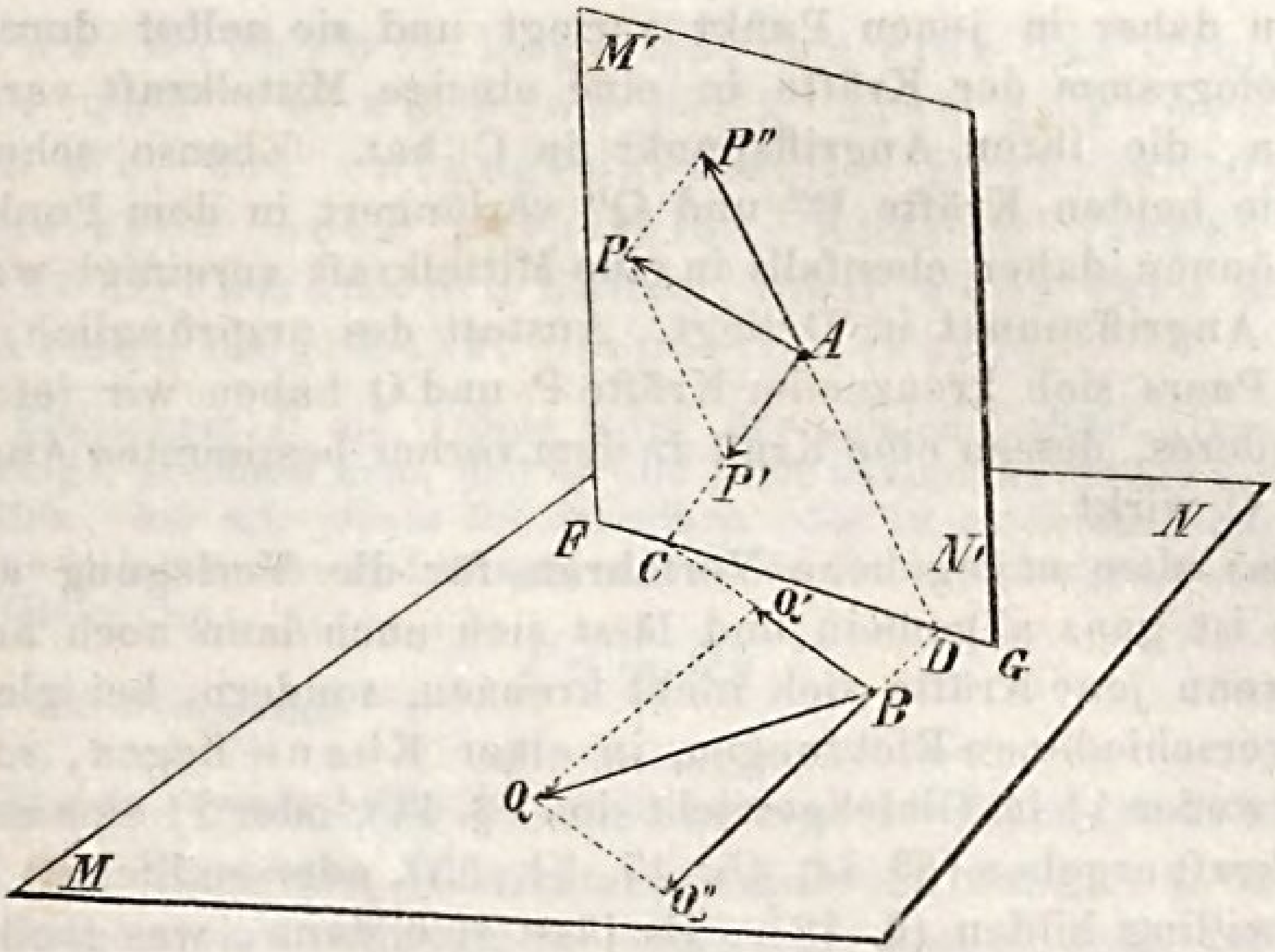


Fig. 59.

und B ihre Angriffspunkte an dem in der Figur nicht gezeichneten Körper und C irgend ein bestimmter Punkt, in dem die eine der Kräfte des zu verlegenden Paars angreifen soll. Wir haben in der nebenstehenden Figur angenommen, dass die Kraft Q und der Punkt C in der Ebene MN liegen. Die Kraft P sowohl als im Allgemeinen auch ihr Angriffspunkt A, werden dann ausserhalb dieser Ebene, etwa darüber, gelegen sein. Wir denken uns von dem Punkte C aus gerade Linie nach den Angriffspunkten A und B gezogen, von denen also die eine, CB, in der Ebene MN liegt, während sich die andere CA von C aus darüber erhebt. Durch die letztere Gerade und durch die Kraft P lässt sich aber, wie durch CB und durch die Kraft Q die Ebene MN, ebenfalls eine Ebene M' N' legen, welche jene in einer durch den Punkt C gehenden Geraden FG schneidet. In dieser Geraden nehmen wir in beliebiger Entfernung von C einen zweiten Punkt D an und ziehen durch denselben ebenfalls zwei Gerade nach den Angriffspunkten A und B. Die eine derselben, DB, liegt wie die CB und die Kraft Q in der Ebene MN. Es lässt sich daher die Kraft Q in dieser Ebene nach den beiden durch die Geraden CB und DB bestimmten Richtungen in zwei Seitenkräfte Q' und Q'' mittelst des Parallelogramms der Kräfte zerlegen. Ebenso die Kraft P in der andern, oben näher bezeichneten Ebene M' N' nach den beiden Richtungen CA und DA in die Seitenkräfte P' und P''. Die zwei Kräfte Q' und P' schneiden sich verlängert in dem Punkte C; ihre Angriffspunkte

können daher in jenen Punkt verlegt und sie selbst durch das Parallelogramm der Kräfte in eine einzige Mittelkraft vereinigt werden, die ihren Angriffspunkt in C hat. Ebenso schneiden sich die beiden Kräfte P'' und Q'' verlängert in dem Punkte D, und können daher ebenfalls in eine Mittelkraft vereinigt werden, deren Angriffspunkt in D liegt. Anstatt des ursprünglich gegebenen Paars sich kreuzender Kräfte P und Q haben wir jetzt also ein anderes, dessen eine Kraft in dem vorher bestimmten Angriffspunkt C wirkt.

Das eben angegebene Verfahren für die Verlegung zweier Kräfte ist ganz allgemein und lässt sich auch dann noch anwenden, wenn jene Kräfte sich nicht kreuzen, sondern, bei gleichen oder verschiedenen Richtungen, in einer Ebene liegen, so dass sie entweder 1) im Gleichgewicht sind (§. 44), oder 2) eine einzige Mittelkraft ergeben (§§. 44, 45, 47, 51, 55), oder endlich 3) einen Drehzwilling bilden (§. 48). Es lässt sich dann, was theilweise vom Gesichtspunkte der Mechanik aus schon von selbst einleuchtet, auf rein geometrischem Wege nachweisen, dass in jenem ersten Falle das durch Verlegung erhaltene Kräftepaar sich gleichfalls das Gleichgewicht hält; dass im 2. Falle die verlegten beiden Kräfte ebenfalls eine Resultante ergeben und zwar von gleicher Grösse wie die des ursprünglichen Kräftepaares und in derselben Geraden wie diese gelegen, in ihrer Wirkung also ganz mit ihr identisch; und dass endlich im dritten Falle der zu verlegende Drehzwilling wieder einen Drehzwilling gibt, dessen Ebene mit derjenigen des gegebenen zusammenfällt oder damit parallel ist, je nachdem der vorher angenommene eine Angriffspunkt in oder ausserhalb der Ebene des ursprünglichen Drehzwillings liegt, und dessen Drehrichtung und Drehungsmoment (§. 48) denen des gegebenen Drehzwillings genau gleich sind. Solche rein geometrische Untersuchungen aber gehören nicht zum Plane dieses Buches. Wir begnügen uns, als für die Folge wichtig, aus dem zuletzt über die Drehzwillinge Gesagten folgende zwei Sätze herauszuheben:

Die Wirkung eines Drehzwillings auf einen Körper bleibt unverändert, wenn man ihn, unter Beibehaltung derselben Drehrichtung, in seiner eigenen oder in einer dazu parallelen Ebene beliebig verlegt und dabei seine Kräfte und zugleich seinen Arm willkürlich aber doch so abändert, dass sein Drehmoment das nämliche bleibt, oder Grösse der beiden Kräfte und Arm des neuen Drehzwillings denen des gegebenen umgekehrt proportional sind.

Zwei Drehzwillinge halten sich das Gleichgewicht und vernichten sich also gegenseitig, wenn sie, bei entgegengesetzten Drehrichtungen, in gleichen oder parallelen Ebenen liegen und gleiche Drehmomente haben, oder wenn ihre Kräfte den Armen umgekehrt proportional sind.

Bezeichnet P die Grösse jeder der beiden Kräfte eines Drehzwillings, p seinen Arm, und Q und q die nämlichen Stücke bei einem zweiten, der mit jenem in derselben oder in einer dazu parallelen Ebene gelegen ist und entgegengesetzte Drehrichtung hat, so muss die Gleichung:

$$Pp = Qq$$

oder die Proportion

$$P : Q = q : p$$

erfüllt sein, damit beide Drehzwillinge sich das Gleichgewicht halten.

§. 57. Nach den Resultaten, welche im vorigen §. von den sich kreuzenden Kräftepaaren entwickelt worden sind, besonders nach der zuletzt erwiesenen Eigenschaft derselben, ist es nun leicht, die Wirkung einer beliebigen Anzahl beliebig gerichteter und in beliebigen Punkten angreifender Kräfte auf einen Körper zu beurtheilen.

Zunächst lässt sich zeigen, dass diese sämmtlichen Kräfte im Allgemeinen auf zwei zurückgeführt werden können. Man gehe von irgend einem Paar der Kräfte, als erstem, aus und verlege dasselbe so, dass der Angriffspunkt der einen der verlegten Kräfte mit dem einer dritten Kraft zusammenfällt. Dann hat man zunächst zwar wieder drei Kräfte, von denen aber zwei in einem Punkte angreifen und daher in eine Mittelkraft vereinigt werden können. Das Paar, welches diese mit der dritten von jenen drei Kräften bildet, verlege man nun so, dass der Angriffspunkt einer der Kräfte mit dem einer vierten von den gegebenen zusammenfällt und verfahre genau so wie vorhin. Auf diese Weise mache man fort, bis man beim Angriffspunkt der letzten Kraft angekommen ist. Die beiden dort angebrachten Kräfte werden dann eine Mittelkraft ergeben, die im Allgemeinen mit der andern Kraft des zuletzt verlegten Paars ein Paar sich kreuzender Kräfte bilden wird. Es können jedoch möglicherweise diese letzten beiden Kräfte auch in einer Ebene liegen, also eine einzige Mittelkraft ergeben, oder im Gleichgewicht sein, oder einen Drehzwilling bilden. Im ersten Fall ist die erhaltene Mittelkraft die Resultante von sämmtlichen gegebenen Kräften. Im 2. Falle sind diese Kräfte im Gleichgewicht, und im 3. Falle endlich kommt ihre Wirkung der eines Drehzwillings gleich, den man auf obige

Weise gefunden hat, und mit dem, wo es nöthig erscheinen sollte, die Veränderungen vorgenommen werden können, die wir am Schlusse des vorigen Paragraphen andeuteten. Es braucht wohl kaum mehr beigefügt zu werden, dass in dem allgemeinen Fall, wo die zuletzt erhaltenen ein Paar sich kreuzender Kräfte bilden, dasselbe wo nöthig ebenfalls so verlegt werden kann, wie es der vorige Paragraph lehrt, also namentlich so, dass die eine der beiden Kräfte einen bestimmten Angriffspunkt erhält. Auch kann dann dieses neue Paar mit Beibehaltung jenes Angriffspunktes in eine Kraft, welche in diesem angreift, und in einen Drehzwilling umgewandelt werden. Und jene Kraft lässt sich dann auch direct sehr leicht finden. Man darf nur sämmtliche gegebene Kräfte mit Beibehaltung ihrer Grösse so parallel mit sich selbst verschieben, dass sie mit ihren Angriffspunkten in jenen gegebenen zu liegen kommen, und sodann ihre Resultante suchen. Diese Resultante ist, wie man leicht sieht, wenn man an den verschobenen Kräften dieselben Zerlegungen und Zusammensetzungen vornimmt, wie oben an den ursprünglich gegebenen, keine andere als jene, neben dem Drehzwilling thätige Kraft.

§. 58. **Allgemeine Gleichgewichts-Bedingungen.** — Nachdem wir nun gesehen haben, wie sich in völlig allgemeiner Weise alle irgendwie auf einen Körper wirkenden Kräfte in ihrer Wirkung durch höchstens zwei ersetzen lassen, ist es leicht, die Bedingungen aufzufinden, unter denen jene gegebenen Kräfte an dem Körper im Gleichgewicht sind.

1) Wenn sich der Körper nach allen Seiten hin frei und ungehindert bewegen kann, so bringen jene beiden Kräfte, auf welche sich sämmtliche an ihm thätigen Einwirkungen zurückführen lassen, offenbar immer eine Wirkung hervor, wenn sie nicht selbst einander gleich und, in derselben geraden Linie liegend, entgegengesetzt sind. *Ein vollkommen freier Körper, auf welchen Kräfte in völlig beliebiger Weise wirken, ist nur dann im Gleichgewicht, wenn die beiden Kräfte, auf welche sich jene zuletzt immer zurückführen lassen, mit ihren Richtungen in die nämliche gerade Linie fallen, einander gleich und entgegengesetzt sind.* Hieraus folgt unmittelbar, dass sich alle Kräfte, mit Ausnahme irgend einer, in eine Resultante müssen vereinigen lassen, die gleich und entgegengesetzt jener einen ist.

2) Wenn ein Punkt des Körpers, auf welchen beliebige Kräfte wirken, festgehalten ist, sodass er seinen Ort durchaus nicht verändern und der ganze Körper nur um ihn drehen kann,

so denke man sich die beiden Kräfte, auf welche sich die gegebenen zurückführen lassen, zuletzt noch so verlegt, dass die eine ihren Angriffspunkt in jenem festen Punkt hat. Diese ist dann offenbar nicht im Stande, an dem Körper eine Bewegung hervorzubringen. Die andere aber wird den Körper allemal um den festen Punkt drehen, wenn nicht ihre Richtung gleichfalls durch den festen Punkt hindurchgeht. In diesem Fall kann man aber ihren Angriffspunkt in den festen Punkt verlegen und sie selbst mit jener ersten Kraft in eine Mittelkraft zusammenfassen, deren Angriffspunkt gleichfalls im fixen Punkt liegt, oder deren Richtung überhaupt durch diesen hindurch geht: Ein Körper mit einem festen Punkte, auf den beliebige Kräfte wirken, ist nur dann im Gleichgewicht, wenn sämmtliche Kräfte sich in eine einzige Mittelkraft vereinigen lassen, deren Richtung durch den festen Punkt hindurch geht. Diese Kraft gibt zugleich den Druck an, mit welchem der Körper an den festen Punkt angedrückt wird.

3) Wenn ein Körper, auf den beliebige Kräfte wirken, eine feste Achse hat, um die er sich blos drehen (nicht auch längs derselben verschieben) kann, so wird man die beiden Kräfte, auf welche sämmtliche Einwirkungen zurückgeführt werden können, zuletzt so verlegen, dass der Angriffspunkt der einen in der Achse liegt. Diese kann dann offenbar den Körper nicht bewegen. Die andere aber wird stets eine Drehung des Körpers um seine Achse zu Stande bringen, wenn ihre Richtung, gehörig verlängert, nicht gleichfalls die Achse schneidet oder zu ihr parallel ist, also überhaupt mit derselben in einer Ebene liegt: Ein um eine feste Achse dreh-, aber nicht längs derselben verschiebbarer Körper, auf den beliebige Kräfte wirken, ist nur dann im Gleichgewicht, wenn von den beiden Kräften, auf welche man sämmtliche Einwirkungen zurückführen kann, nachdem man sie so verlegt hat, dass der Angriffspunkt der einen in der Achse liegt, die andere die Achse ebenfalls schneidet (also mit ihrem Angriffspunkt in dieselbe verlegt werden kann) oder zu ihr parallel ist.

Sei M (Fig. 60) der Körper mit der festen Achse AB, die in den Lagern A und B sich wohl drehen, nicht aber der Länge nach verschieben kann. P und Q mit den Angriffspunkten a und b in der Achse seien die beiden, im Allgemeinen sich kreuzenden

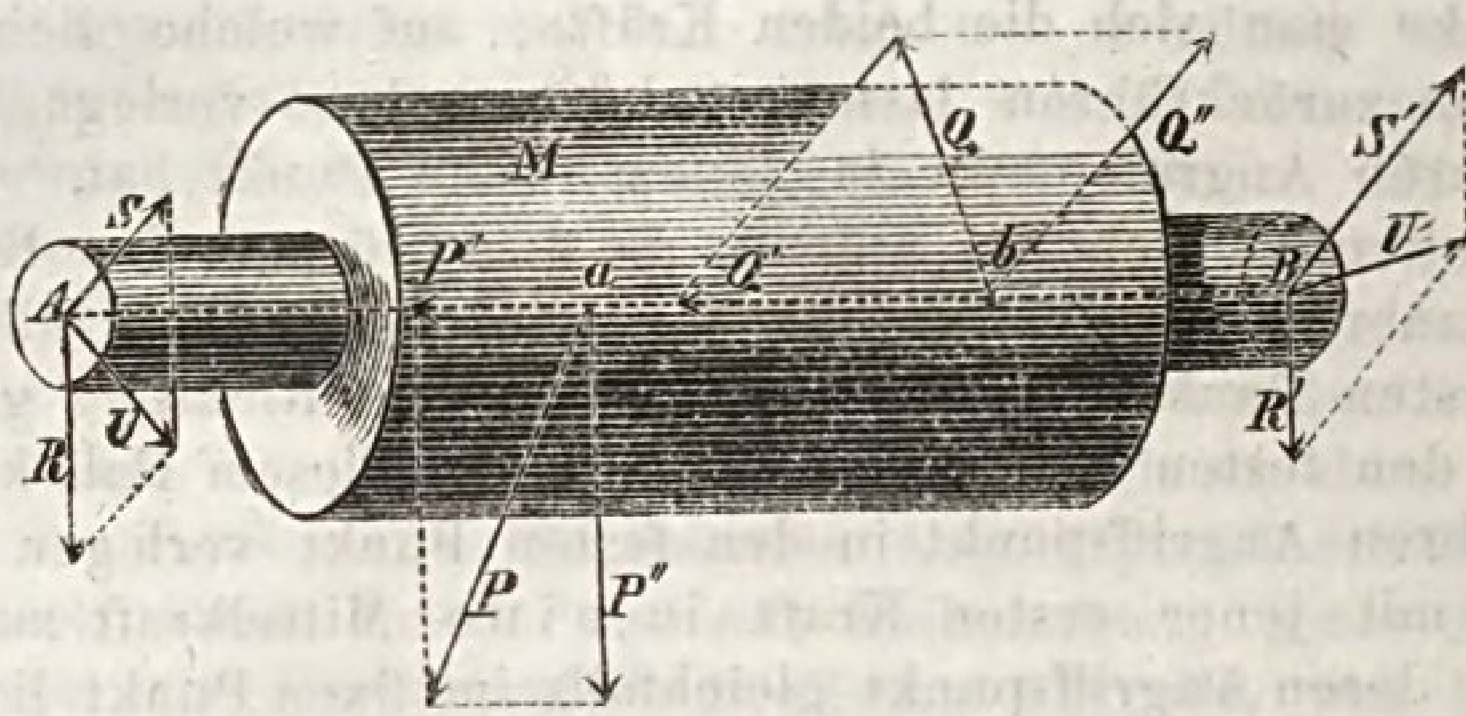


Fig. 60.

Kräfte, auf welche sich sämmtliche auf den Körper ausgeübte Einwirkungen zurückführen lassen; der Körper ist also im Gleichgewicht. Jede der beiden Kräfte P und Q kann man mittelst des Parallelogramms der Kräfte in zwei andere P′, P″ und Q′, Q″ zerlegen, von denen die einen, P′, Q′, längs der Achse, die anderen, P″, Q″, senkrecht dazu wirken. Die beiden, in der nämlichen Geraden liegenden Kräfte P′, Q′ lassen sich, wenn sie nicht im Gleichgewicht sind, in eine Mittelkraft (gleich ihrer Summe oder Differenz, je nachdem sie gleiche oder entgegengesetzte Richtung haben) vereinigen, welche den Druck angibt, den der Körper längs der Achse erfährt. Die beiden andern, zur Achse senkrechten Kräfte P″ und Q″ geben den Druck, mit welchem der Körper gegen die Achse angedrückt wird. Dieser Druck überträgt sich auf die Achsenlager A und B, und man erhält die dort thätigen Einwirkungen, wenn man jede der Kräfte P″ und Q″ in zwei andere, R und R′, S und S′ zerlegt, die bezüglich zu ihnen parallel sind und in den Punkten A und B angreifen. Die Summe eines Paars solcher Seitenkräfte, R und R′ z. B., muss nach §. 45 gleich ihrer Mittelkraft P″ sein, und ihre Grössen einzeln müssen sich umgekehrt wie die Entfernungen ihrer Angriffspunkte A, B von dem der Mittelkraft *a* verhalten. — Die beiden in A angreifenden Seitenkräfte R und S können aber nun mittelst des Kräfteparallelogramms in eine, wie man leicht sieht, gleichfalls zur Achse senkrechte Mittelkraft U vereiniget werden, und diese ist der Druck gegen das Achsenlager A. Ebenso gibt die Mittelkraft U′ der beiden in B angreifenden Kräfte R′ und S′ den Druck gegen das Achsenlager B.

Wenn die eine der beiden gegebenen Kräfte P und Q, letztere z. B., mit der Achse parallel ist, so denke man sich von ihrem Angriffspunkt aus zwei Linien nach der Achse gezogen; die eine durch den Angriffspunkt *a* der Kraft P, die andere durch einen

willkürlichen Punkt der Achse. Beide Linien liegen mit der Achse und mit der Kraft Q in einer Ebene, und letztere kann daher nach ihren Richtungen in zwei Seitenkräfte zerlegt werden. Die eine dieser Seitenkräfte kann offenbar mit der Kraft P in eine Mittelkraft, deren Angriffspunkt *a* ist, vereinigt werden; die andere ist mit ihrem Angriffspunkt in die Achse zu verlegen; und so hat man jetzt den oben schon behandelten Fall, wo die Angriffspunkte beider Kräfte in der Achse liegen.

Die allermeisten Maschinentheile sind Körper, welche sich um feste Achsen drehen. Bei denselben ist es von grosser Wichtigkeit, den Druck, den sie in Folge der auf sie wirkenden Kräfte auf ihre Achsenlager ausüben, kennen zu lernen. Das Vorhergehende zeigt in ganz allgemeiner Weise den hiezu einzuschlagenden Weg.

4) In der Anwendung kommt noch häufig der Fall vor, dass ein Körper auf einer festen ebenen Fläche aufliegt. Wir denken uns alsdann das letzte Paar von Kräften, auf das nach §. 56 alle auf den Körper ausgeübten Einwirkungen zurückgeführt werden können, und von dem wir voraussetzen, dass es nicht für sich schon im Gleichgewicht sei, so verlegt, dass der Angriffspunkt A (Fig. 61) der einen, P, irgendwo in der festen Ebene liegt. Die andere Kraft sei Q, in beliebiger Lage gegen die erste P, und mit ihrem Angriffspunkt irgendwo in B. Man verwandle nun das Kräftepaar P, Q so, dass die Kraft Q parallel zur festen Ebene wird, wenn sie es nicht schon ist. Zu diesem Behufe ziehe man die Linie AB und zerlege die Kraft Q mittelst des Kräfteparallelogramms in zwei solche Kräfte Q′ und R, dass die eine, Q′, in der Linie AB oder

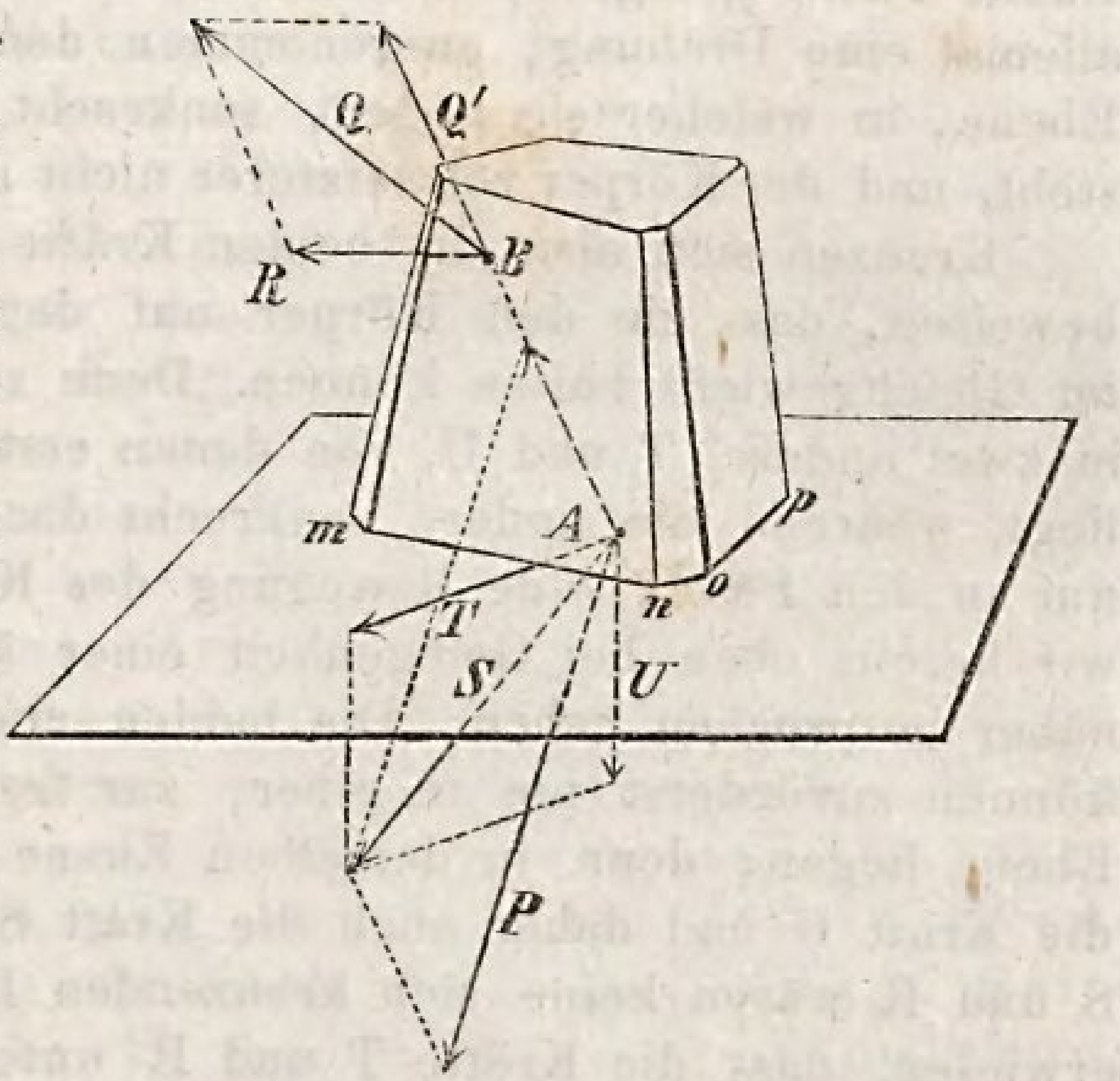


Fig. 61.

in ihrer Verlängerung liegt, während die andere, R, parallel zur festen Ebene ist. Die Kraft Q′ kann mit ihrem Angriffspunkt auch nach A verlegt und dort mit der Kraft P zu einer Mittel-

kraft S vereinigt werden. Wir haben somit jetzt eine Kraft S, deren Angriffspunkt A irgendwo in der festen Ebene liegt, und eine zweite Kraft R, parallel zu dieser Ebene. Betrachten wir nun diese beiden Kräfte etwas näher: Kreuzen sich dieselben nicht, sondern liegen sie in einer Ebene, so können sie entweder in eine Mittelkraft vereinigt werden, oder sie bilden einen Drehzwilling. Im ersten Falle wird der Körper allemal längs der festen Ebene fortbewegt, wenn jene Mittelkraft nicht senkrecht zu dieser Ebene gerichtet ist, wie man leicht einsieht, wenn man nur recht im Auge hat, dass wir vorläufig von aller Reibung absehen. Ja in dem Falle, wo der Körper blos lose auf der festen Ebene aufliegt, muss selbst die senkrechte Kraft noch in dem Sinne gerichtet sein, dass sie ihn an die feste Ebene andrückt, nicht von derselben zu entfernen sucht, und dass sie, wonöthig gehörig verlängert, die feste Ebene innerhalb der Figur *m n o p* durchschneidet, welche alle Berührungspunkte des Körpers mit der festen Ebene umschliesst, ohne einspringende Winkel zu bilden. Ausserdem würde sie offenbar den Körper um den ihr zunächst gelegenen Theil des Umfangs jener Figur umkanten. Wenn endlich die beiden Kräfte S und R einen Drehzwilling bilden (wo dann natürlich die Kraft S in der festen Ebene selbst gelegen sein müsste), so ertheilen sie dem Körper allemal eine Drehung, ausgenommen den einzigen Fall, wo die Ebene, in welcher sie liegen, senkrecht auf der festen Ebene steht, und der Körper von letzterer nicht abgehoben werden kann.

Kreuzen sich aber die beiden Kräfte S und R, so lässt sich beweisen, dass sie den Körper auf der festen Ebene niemals im Gleichgewicht halten können. Denn zerlegt man die Kraft S in zwei andere, T und U, von denen erstere in der festen Ebene liegt, während die andere senkrecht dazu ist, so kann letztere nur in den Fällen eine Bewegung des Körpers hervorrufen, die wir bereits oben bei Gelegenheit einer ähnlichen solchen Kraft näher besprochen haben. Die beiden anderen Kräfte, T und R, können zuvörderst nie in einer, zur festen Ebene senkrechten Ebene liegen; denn in derselben Ebene würde sich dann auch die Kraft U und daher auch die Kraft S finden, und die Kräfte S und R wären keine sich kreuzenden Kräfte. Damit ist aber erwiesen, dass die Kräfte T und R unter den gemachten Voraussetzungen keinen Drehzwilling bilden können, dessen Ebene senkrecht zur festen ist, und der wenigstens einen Körper, der von der festen Ebene nicht abhebbar wäre, im Gleichgewicht liesse. Zum anderen können aber die Kräfte T und R nicht für

sich im Gleichgewicht sein. Denn dies wäre nur möglich, wenn R auch in der festen Ebene und zwar, zugleich mit T, in der Verbindungslinie ihrer Angriffspunkte liegen würde und jener gleich und entgegengesetzt wäre, was aber wiederum erfordern würde, dass schon S und R in einer zur festen Ebene senkrechten Ebene lägen, sich also nicht kreuzten. In jedem anderen Falle aber ertheilen die Kräfte T und R dem Körper allemal eine Bewegung längs der festen Ebene. Und diese Bewegung kann auch in dem Falle, wo bei einem, von der festen Ebene abhebbaren Körper die Kraft U die oben angegebenen Bedingungen nicht erfüllt und daher eine Wirkung auf den Körper auszuüben vermag, von dieser Kraft U nicht aufgehoben werden. Es müssten ja sonst die Kräfte T und R eine jener U gleiche, und in derselben geraden Linie entgegengesetzte, also auf der festen Ebene senkrechte Mittelkraft ergeben, was nur möglich wäre, wenn jene beiden Kräfte selbst in einer zur festen Ebene senkrechten Ebene lägen, und dass dies unter den gemachten Voraussetzungen nicht möglich ist, wurde bereits oben dargethan.

Dies Alles zusammengefasst, gelangen wir zu dem Satz: Ein nur lose auf einer festen Ebene liegender Körper ist nur dann im Gleichgewicht, wenn sich sämmtliche auf ihn wirkende Kräfte in eine einzige Mittelkraft zusammen fassen lassen, die senkrecht zur festen Ebene, und zwar nach der von dem Körper abgewendeten Seite derselben hin gerichtet ist, und welche, wo nöthig verlängert, die feste Ebene noch innerhalb der Figur durchschneidet, welche alle Berührpunkte des Körpers mit dieser Ebene umschliesst, ohne einspringende Winkel zu bilden. Zugleich gibt diese Mittelkraft dann den Druck des Körpers gegen die feste Ebene an. — Wenn aber der Körper bleibend mit der festen Ebene verbunden ist, sodàss er nur längs derselben verschoben, nicht aber abgehoben werden kann, so genügt es für sein Gleichgewicht, dass sich sämmtliche auf ihn stattfindende Einwirkungen in eine zur festen Ebene senkrechten, übrigens nach einer beliebigen Seite gerichteten Mittelkraft, welche dann die Einwirkung des Körpers auf die feste Ebene ergibt, oder auch in einen Drehzwilling vereinigen lassen, dessen beide Kräfte in einer, zur festen senkrechten Ebene liegen.

III. Vom Schwerpunkt.

§. 59. **Begriff des Schwerpunktes.** — Nach §. 4 denken wir uns alle Körper aus Atomen oder Molekülen bestehend. Jedes dieser Moleküle ist schwer; es ist der Einwirkung einer Kraft unterworfen, welche vertikal von oben nach unten wirkt, und welche sein Gewicht genannt wird. Die Gewichte der verschiedenen Moleküle, aus denen ein Körper besteht, sind also ebensoviele Kräfte, welche in den Punkten, wo sich die Moleküle befinden, auf den Körper einwirken. Die Vertikallinien, welche durch diese Punkte gezogen werden, kann man, wenigstens in den Fällen, wo der Körper nicht sehr grosse Dimensionen hat, als unter sich parallel ansehen; alle die Kräfte also, von denen wir eben gesprochen haben, sind unter sich parallel und in dem nämlichen Sinn gerichtet; sie haben folglich eine Mittelkraft, und diese Mittelkraft, gleich der Summe sämmtlicher Seitenkräfte, ist es, die wir das G e w i c h t des ganzen Körpers genannt haben.

Um die Mittelkraft der Gewichte der einzelnen Moleküle eines festen Körpers zu finden, vereinigt man diese Gewichte ganz in derselben Weise, wie es in §. 46 von einer beliebigen Anzahl paralleler Kräfte gezeigt wurde, die in dem nämlichen Sinne auf einen festen Körper wirken. Denken wir uns, um die Betrachtung zu vereinfachen, der in Rede stehende feste Körper bestehe nur aus 4 Molekülen A, B, C, D (Fig. 62), deren Gewichte unter sich gleich und gleich einem Milligramm seien. Die Kräfte, welche in A und B angreifen, vereinigen sich in eine einzige Kraft von 2 Milligrammen, die in dem Punkte E, der in der Mitte zwischen A und B liegt, angebracht werden muss. Diese erste Mittelkraft setzt sich nun ihrerseits wieder mit der in C wirkenden dritten Kraft in eine Mittelkraft von 3 Milligrammen zusammen, welche in dem Punkt F angreift, der zwischen E und C auf der Linie EC so liegt, dass EF die Hälfte von FC oder, was auf dasselbe hinauskommt, der dritte Theil von EC ist. Die so erhaltene zweite Mittelkraft von 3 Milligrammen vereinigt sich endlich mit der in dem Punkte D wirkenden Kraft, und man erhält dadurch die Mittelkraft aller 4 Kräfte, deren Grösse gleich 4 Milligrammen und deren Angriffs-

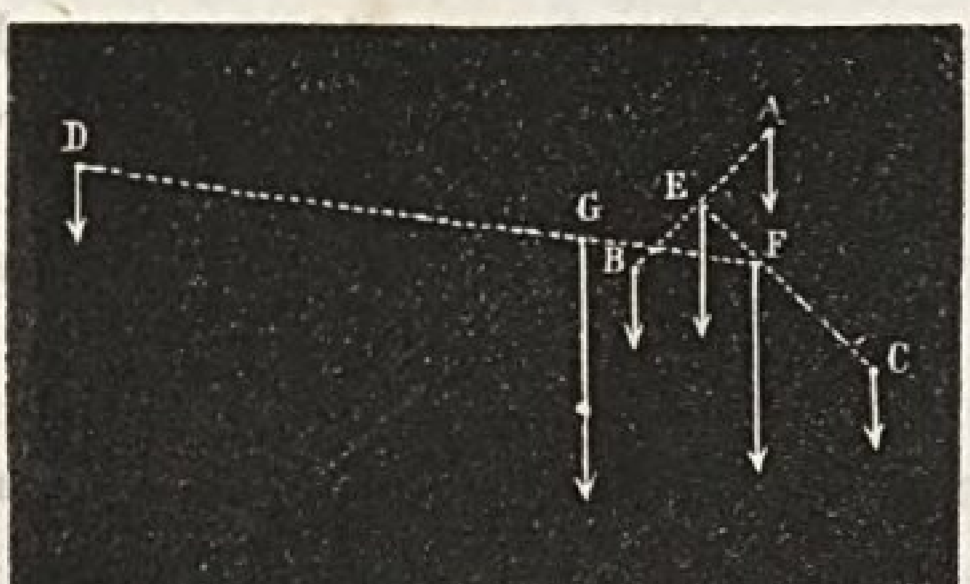


Fig. 62.

punkt G auf der Linie FD so gelegen ist, dass seine Entfernung von F den vierten Theil dieser Linie beträgt.

Denken wir uns nun, dass man den aus den Molekülen A, B, C, D bestehenden Körper drehe, um ihm eine andere Lage zu geben, ohne jedoch dabei seine Gestalt d. h. die gegenseitige Lage seiner Moleküle zu verändern. An dem so gedrehten Körper können wir nun die Zusammensetzung der Gewichte der einzelnen Moleküle ganz eben so wiederholen, wie es so eben in der ersten Lage des Körpers geschehen ist; und wenn wir Sorge tragen, die Kräfte auch in derselben Ordnung wie oben mit einander zu vereinigen, wie es Fig. 63 zeigt, so leuchtet von selbst ein, dass wir für die Angriffspunkte der einzelnen Mittelkräfte und der Hauptmittelkraft dieselben Punkte E, F, G wieder finden, die wir schon oben gefunden hatten.

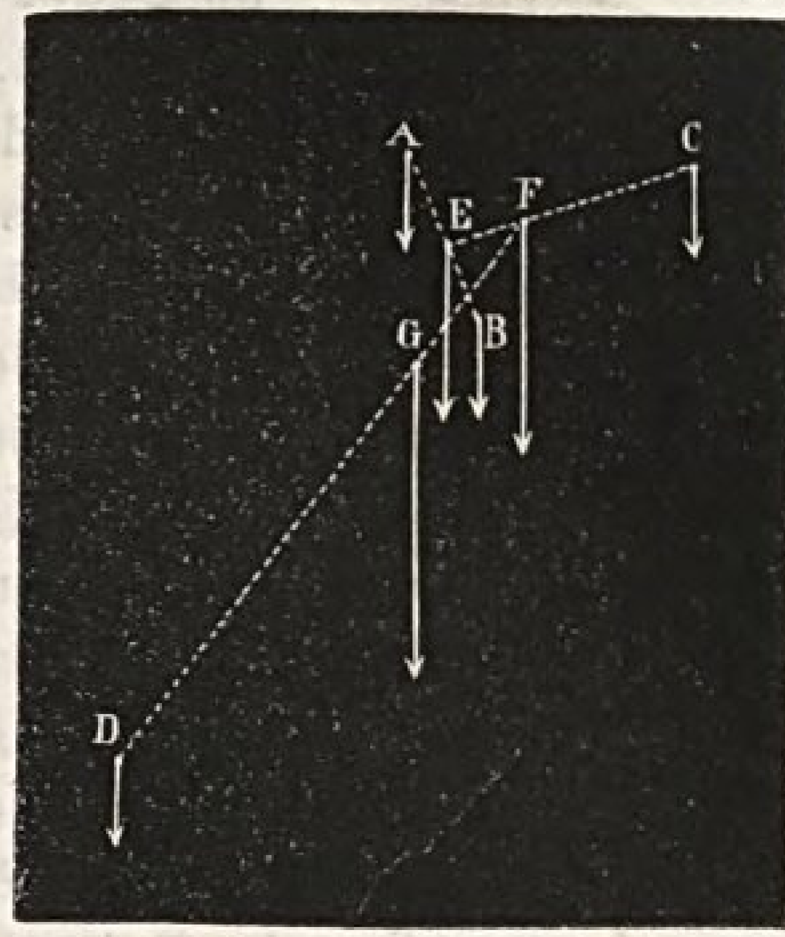


Fig. 63.

Das Resultat, welches wir erhalten haben, bleibt offenbar dasselbe, welches auch die Anzahl der Moleküle eines Körpers ist, und welche Gewichte diese Moleküle auch haben mögen; ob sie durchweg gleich sind oder ob sie ungleiche Grösse haben. Wir haben nur der klareren Darstellung halber die Zahl der Moleküle auf vier beschränkt und vorausgesetzt, dass sie alle gleich schwer seien. In keinem Falle ist der Angriffspunkt der Resultante der Gewichte aller einzelnen Moleküle eines Körpers von der Lage, welche man dem Körper gibt, abhängig; er wird stets dieselbe Stellung gegen die Moleküle des Körpers einnehmen.

Der Punkt, dessen Existenz wir so eben nachgewiesen haben, und durch welchen stets die Mittelkraft der Gewichte der verschiedenen Moleküle des Körpers hindurchgeht, welches auch die Lage des Körpers sein mag, ist nach der am Ende des §. 46 gegebenen Erklärung nichts anderes als der Mittelpunkt der auf die einzelnen Moleküle des Körpers wirkenden Schwerkräfte. Er heisst kurzweg der S c h w e r p u n k t dieses Körpers.

§. 60. **Bestimmung des Schwerpunkts eines Körpers durch den Versuch.** — Wenn ein Körper in einem Punkte A (Fig. 64) seiner Oberfläche mittelst einer Schnur aufgehängt ist, so nimmt er eine gewisse Gleichgewichtslage an. Die Kraft, welche ihn dabei herabfallen zu machen sucht, ist sein

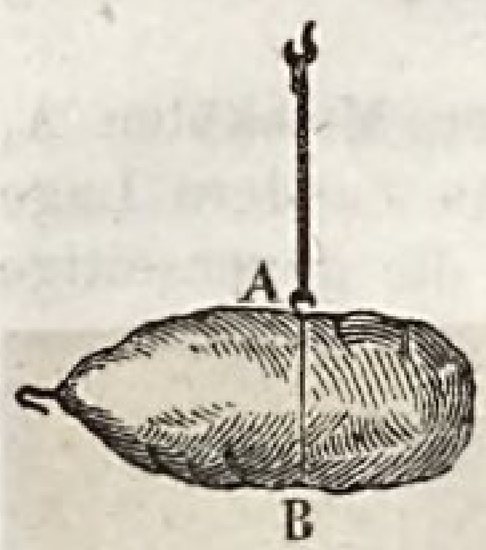


Fig. 64.

Gewicht, und der Angriffspunkt dieser Kraft liegt in seinem Schwerpunkt. Wenn der Körper nicht herab fällt, so kommt das davon her, dass von Seite der Schnur eine Zugkraft auf ihn ausgeübt wird, welche, von unten nach oben gerichtet, jener ersten Kraft das Gleichgewicht hält und ihr folglich gleich und entgegengesetzt sein muss. Daraus folgt, dass, wenn man sich die Richtung der Schnur in das Innere des Körpers nach der Linie AB verlängert denkt, diese Linie durch den Schwerpunkt des Körpers gehen muss.

Wenn man nun den Körper an einem zweiten Punkt seiner Oberfläche aufhängt, so nimmt er eine neue Gleichgewichtslage (Fig. 65) an. In dieser neuen Gleichgewichtslage geht die in das Innere des Körpers nach der Linie CD geführte Verlängerung der Schnur ebenfalls durch den Schwerpunkt des Körpers. Dieser kann daher nur im Durchschnitt G der Linien AB, die man sich angemerkt hat, und CD gelegen sein.

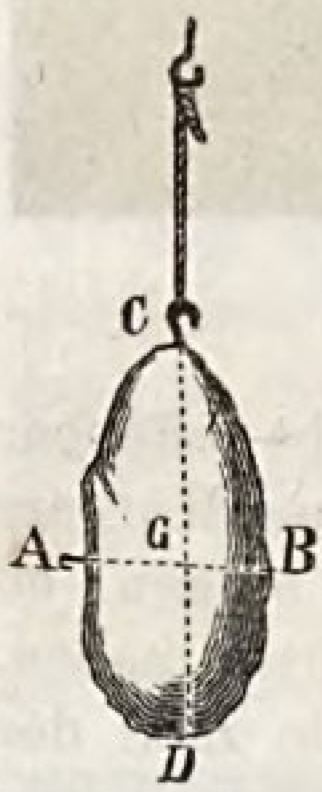


Fig. 65.

Das Verfahren, welches wir eben für die Aufsuchung des Schwerpunktes eines Körpers angegeben haben, ist in der Wirklichkeit schwer ausführbar, da es verlangt, dass die Linien AB und CD durch das Innere des Körpers geführt werden sollen. Aber wenn es aus diesem Grunde auch zu keiner sehr genauen Bestimmung der Lage des Schwerpunktes führen kann, so liefert es doch in vielen Fällen genügende Anzeigen über die Stellung, welche dieser Punkt im Innern des Körpers einnimmt. Nehmen wir z. B. einen Spazierstock, der an seinem oberen Ende mit einem Elfenbeinknopf versehen ist. Dieser Stock sei um eine Achse, welche der Länge nach durch ihn hindurchgeht, symmetrisch angeordnet, so ist klar, dass der Schwerpunkt in dieser Achse gelegen sein muss. Um seine Lage in dieser Achse zu finden, darf man nur den Stock an einer Schnur so aufhängen, dass er in horizontaler Lage bleibt, oder wie es einfacher ist, ihn auf die nach oben gekehrte Kante eines feststehenden Körpers setzen, wie es die Fig. 66 zeigt; man sucht durch Probiren, in welchem Punkte der Stab unterstützt werden muss, um mit Hilfe dieses einzigen Unterstützungspunktes horizontal zu bleiben; sein Schwerpunkt liegt dann in dem



Fig. 66.

Punkt der Achse, welcher sich vertikal über dem Unterstützungspunkt befindet.

§. 61. Schwerpunkt eines homogenen Körpers, der einen Mittelpunkt hat. — In vielen Fällen ist die Materie, aus welcher ein Körper besteht, gleichmässig über alle Theile des Raums, welchen derselbe einnimmt, ausgebreitet; sodass, wenn man sich aus den verschiedenen Theilen des Körpers die Menge von Materie, die z. B. in einem Cubikmillimeter enthalten ist, herausgenommen denkt, das Gewicht derselben überall gleich gross ist, welches auch der Punkt des Körpers sein mag, von welchem sie genommen wurde. In diesem Fall hängt offenbar die Lage des Schwerpunktes nur von der Gestalt des Körpers ab, und die Aufsuchung dieses Punktes reducirt sich auf eine geometrische Aufgabe.

In der Geometrie versteht man unter dem Mittelpunkt eines Körpers denjenigen Punkt, welcher die Eigenschaft hat, dass er jede gerade Linie, welche durch ihn gezogen und die zu beiden Seiten durch die Oberfläche des Körpers begrenzt wird, in zwei gleiche Theile theilt. Daraus folgt leicht, dass allemal, wenn ein homogener Körper einen Mittelpunkt hat, dieser sein Schwerpunkt sein muss. Denn in diesem Fall findet man zu jedem Molekül des Körpers ein zweites, das so gelegen ist, dass seine Verbindungslinie mit dem ersten durch den Mittelpunkt des Körpers geht und durch diesen halbirt wird; der Angriffspunkt der Mittelkraft der Gewichte je zweier solcher Moleküle liegt also in jenem Mittelpunkt, und dieser ist daher auch der Angriffspunkt der Mittelkraft der Schwerkräfte sämmtlicher Moleküle des Körpers, d. h. der Schwerpunkt desselben. So liegt also der Schwerpunkt eines Parallelepipeds (Fig. 67) im Durchschnittspunkt zweier Körperdiagonalen; eben so liegt der Schwerpunkt eines senkrechten (Fig. 68) oder schiefen (Fig. 69) Cylinders in der Mitte der geraden Linie, welche die Mittelpunkte seiner Grundflächen verbindet; desgleichen liegt der Schwerpunkt einer Kugel im Mittelpunkt dieser Kugel, und der Schwerpunkt eines Ringes

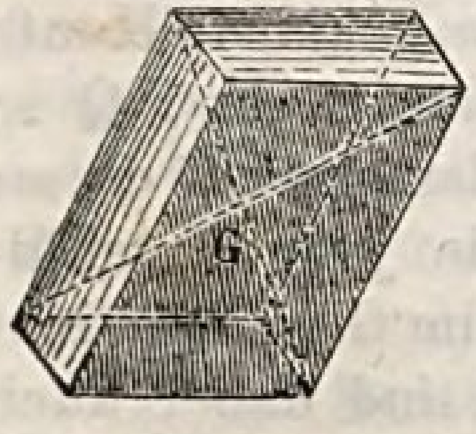


Fig. 67.

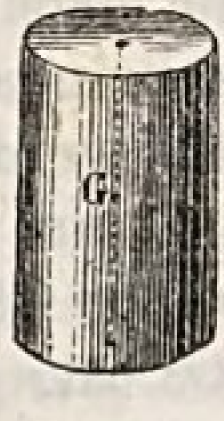


Fig. 68.

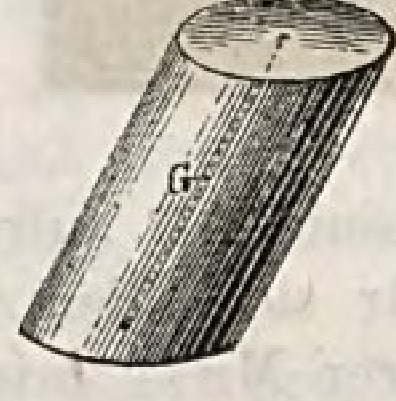


Fig. 69.

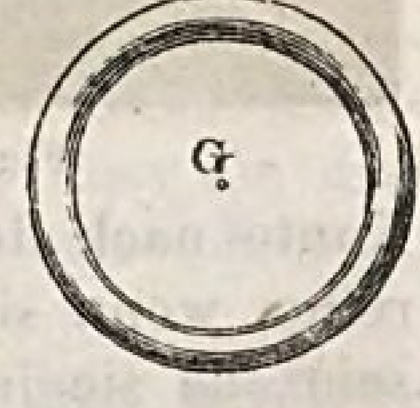


Fig. 70.

(Fig. 70) im Mittelpunkte dieses Rings. Das letzte Beispiel zeigt, dass der Schwerpunkt eines Körpers nicht nothwendig in dem Theil des Raumes gelegen sein muss, welcher durch die Materie des Körpers ausgefüllt ist.

§. 62. **Schwerpunkt einer ebenen Fläche.** — Manchmal hat der Körper, dessen Schwerpunkt gefunden werden soll, eine durchweg gleiche, im Verhältniss zu seinen übrigen Dimensionen sehr kleine Dicke, sodass man von selbst dazu geführt wird, von derselben ganz zu abstrahiren und den Körper als blose Fläche zu betrachten. Dies ist z. B. bei einer dünnen Tafel Blech der Fall. Wenn nun ein solcher Körper auch noch homogen ist, so hängt die Lage seines Schwerpunkts wiederum blos von der Gestalt der Fläche ab, auf welche man sich ihn reducirt denkt. Auf diese Weise wird man darauf geführt, den Schwerpunkt einer Fläche zu suchen.

Auf demselben Wege wie oben gelangt man zur Ueberzeugung, dass der Mittelpunkt jeder ebenen Figur der Schwerpunkt derselben sein muss. Desshalb liegt der Schwerpunkt eines Parallelogramms (Fig. 71) im Durchschnittspunkt seiner Diagonalen, der Schwerpunkt einer Kreisfläche in ihrem Mittelpunkt, sowie der Schwerpunkt jedes regelmässigen Vielecks im Mittelpunkte dieses Vielecks.

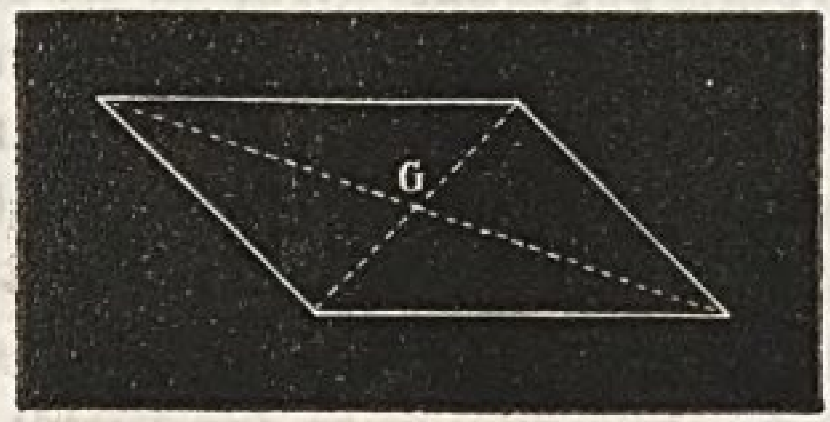


Fig. 71.

Um den Schwerpunkt eines Dreiecks (Fig. 72) zu finden, bemerken wir, dass die Linie AD, welche die Spitze A mit der Mitte der Grundlinie BC verbindet, alle Linien, welche wie *mn* parallel zur Grundlinie gezogen sind, in zwei gleiche Theile theilt. Denken wir uns nun, dass die Moleküle, aus denen unser Dreieck besteht, längs diesen zur Grundlinie parallelen Linien regelmässig gereiht seien, und dass das Dreieck auf die nach oben gekehrte Kante eines prismatischen Stabs PQ so gesetzt werde, dass es auf dieser Kante nach der Linie AD aufruht. Dann würde jede Molekülreihe, wenn sie für sich allein vorhanden wäre, im Gleichgewicht sein, da sie in ihrer Mitte unterstützt ist. Es sind daher auch noch alle die zum Dreieck verbundenen Molekülreihen im Gleich-

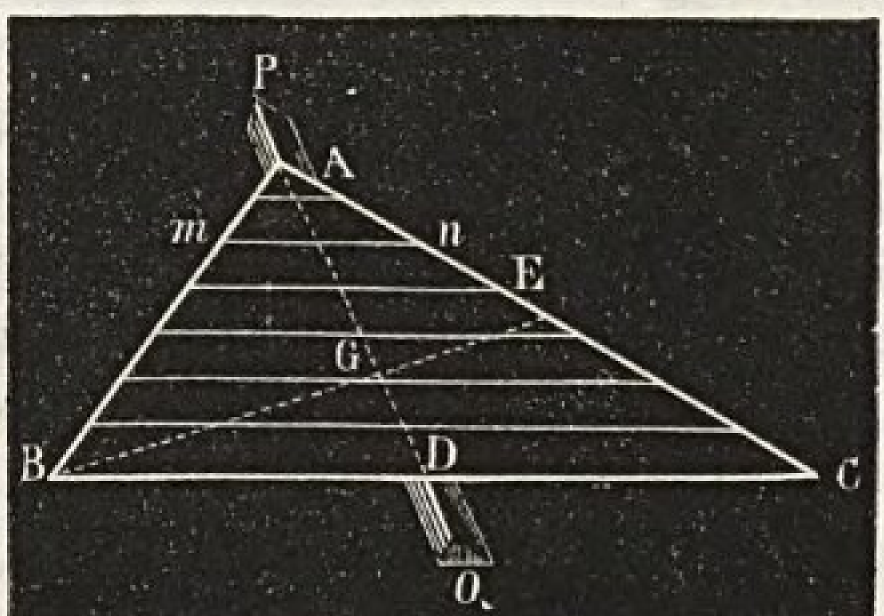


Fig. 72.

gewicht, und das Dreieck sucht daher weder nach der einen noch nach der andern Seite zu fallen; man schliesst daraus, dass der Schwerpunkt des Dreiecks in der Linie AD gelegen sein muss. Ganz auf dieselbe Weise ergibt sich, dass er auch in der Linie liegen muss, welche die Ecke B mit der Mitte E der gegenüberliegenden Seite verbindet; er liegt also im Durchschnittspunkt G dieser beiden Linien. In der Geometrie wird gezeigt, dass der so erhaltene Punkt G die Linie AD in zwei Theile theilt, von denen der eine AG doppelt so gross als der andere GD ist; man kann also sagen, dass der Schwerpunkt eines Dreiecks auf der Linie gelegen ist, welche die Spitze desselben mit der Mitte der gegenüberliegenden Grundlinie verbindet, und zwar in demjenigen von den zwei Punkten, welche diese Linie in drei gleiche Theile theilen, der näher an der Grundlinie gelegen ist.

Hieran reiht sich leicht die folgende Aufgabe, welche eine hübsche Anwendung des Schwerpunkts zeigt. Drei Männer tragen ein schweres Dreieck ABC (Fig. 73) jeder an einer Ecke; welcher von ihnen ist der am meisten, und welcher der am wenigsten belastete? Das Gewicht des Dreiecks, welches wir gleich 45^k voraussetzen wollen, ist eine Kraft, welche in dem Schwerpunkte G desselben angreift. Die Linie BG geht, wie wir oben gesehen haben, verlängert durch die Mitte D der Seite AC und die Länge BG ist doppelt so gross als GD; wir können daher die in dem Punkte G vertikal abwärts wirkende Kraft von 45^k als Resultante zweier paralleler, vertikal abwärts wirkender

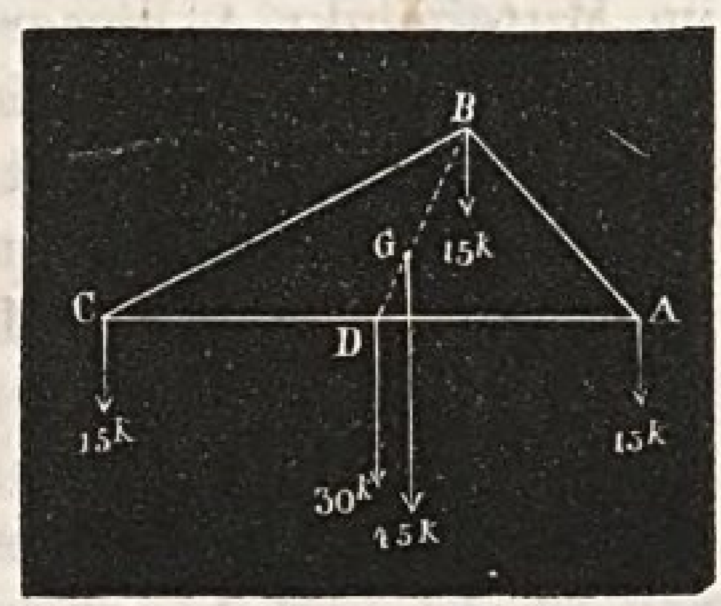


Fig. 73.

Kräfte betrachten, von denen die eine von 15^k in B, die andere von 30^k in dem Punkt D angreift. Aber diese letztere Kraft, welche in der Mitte von AC angebracht ist, kann wiederum als aus der Zusammensetzung zweier Kräfte hervorgegangen gedacht werden, deren jede gleich 15^k ist, und von denen die eine im Punkte A, die andere in dem Punkt C angreift. Es kann also das Gewicht des Dreiecks durch drei Kräfte ersetzt werden, die, jede in der Grösse von 15^k, an den drei Eckpunkten des Dreiecks vertikal abwärts wirken; und daraus folgt, dass die drei Männer, welche das Dreieck tragen, gleichstark belastet sind, welches auch die Gestalt des Dreiecks ist.

§. 63. **Schwerpunkt eines Körpers, der aus mehreren Theilen besteht.** — Wenn man die Gewichte und die

Schwerpunkte der verschiedenen Theile kennt, aus denen ein Körper besteht, so ist es leicht, den Schwerpunkt des ganzen Körpers zu finden. Nehmen wir z. B. zwei ungleich grosse homogene Kugeln, welche durch einen ebenfalls homogenen, cylindrischen Stab fest mit einander verbunden sind (Fig. 74).

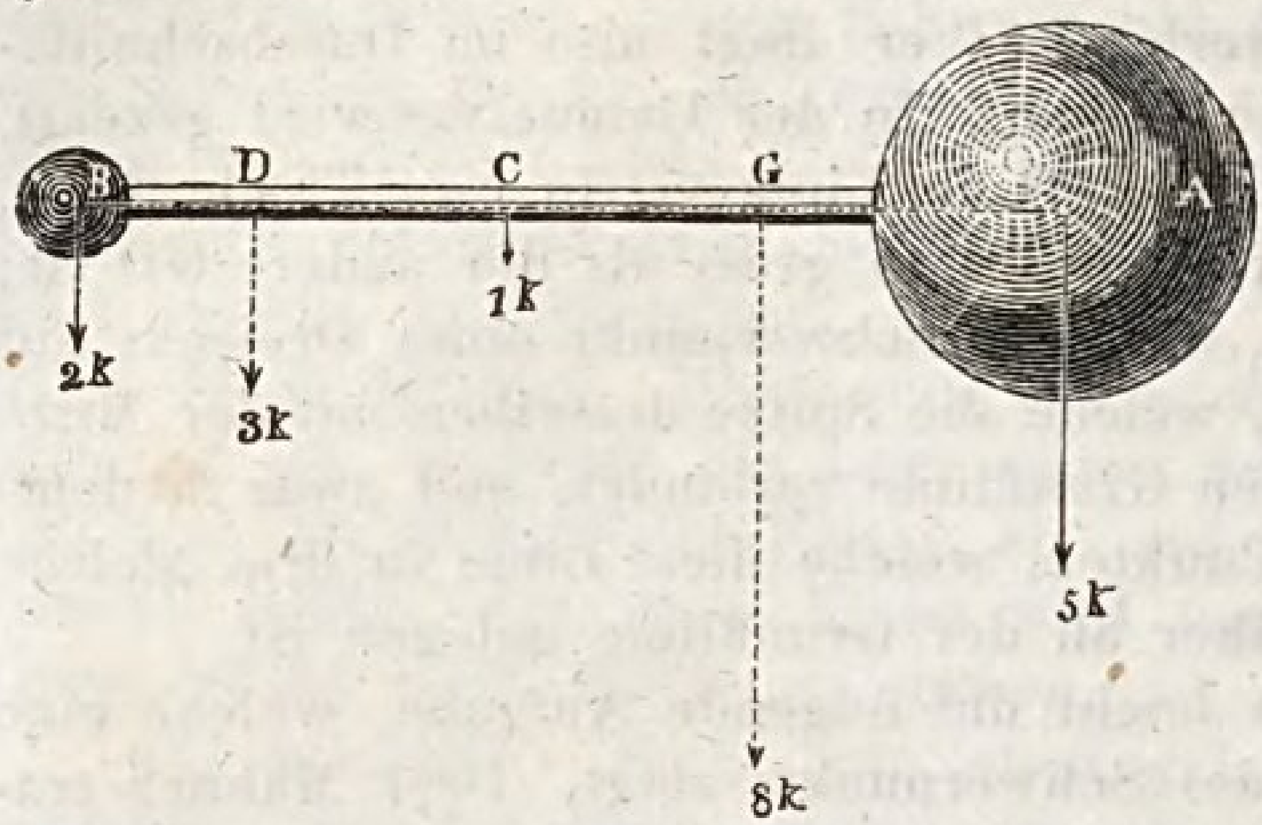


Fig. 74.

Die grösste der beiden Kugeln sei 5, die kleinere 2 und der beide verbindende Stab 1 Kilogramm schwer. Der Schwerpunkt des ganzen Körpers ist der Angriffspunkt der Mittelkraft der Gewichte seiner verschiedenen Moleküle. Man kann nun zunächst die Gewichte der Moleküle der grossen Kugel unter sich vereinigen, und erhält dadurch eine Kraft von 5^k, welche im Mittelpunkt A dieser Kugel angreift; ebenso vereinigt man die Gewichte der Moleküle der kleinen Kugel unter sich, und findet dadurch eine Mittelkraft von 2^k, welche in dem Punkte B, dem Mittelpunkte dieser kleinen Kugel, anzubringen ist; die Mittelkraft der Gewichte der Moleküle des Stabs endlich, welcher beide Kugeln mit einander verbindet, ist eine Kraft von 1^k, welche in dem Punkte C, dem Mittelpunkt der Achse dieses Stabs, angreift. Es bleibt nun blos noch übrig, diese drei parallelen Kräfte von 5^k, 2^k und 1^k, welche bezüglich in den Punkten A, B, C wirken, in e i n e Kraft zusammenzusetzen, um die Mittelkraft der ganzen Verbindung zu erhalten, deren Angriffspunkt der gesuchte Schwerpunkt ist. Zu diesem Behufe setze man zuerst die beiden Kräfte von 2^k und 1^k, die in den Punkten B und C angreifen, zu einer einzigen von 3^k zusammen, deren Angriffspunkt D in der Linie BC so liegt, dass BD die Hälfte von CD ist; diese Kraft von 3^k im Punkte D vereinige man alsdann mit der von 5^k, welche in A angreift, zu einer Mittelkraft von 8^k, deren Angriffspunkt G in der Linie DA so gelegen ist, dass sich AG zu GD verhält wie 3 zu 5. Dieser Punkt G ist der Schwerpunkt der ganzen Körperverbindung.

Durch dasselbe Verfahren, durch welches wir eben den Schwerpunkt einer Zusammensetzung von mehreren Körpern gefunden haben, kann man nun auch den Schwerpunkt eines Körpers

finden, den man eben zu diesem Behufe in Theile zerlegt, deren Schwerpunkte für sich gefunden werden können. Wenn man z. B. den Schwerpunkt der Fläche irgend einer ebenen geradlinigen Figur, eines Fünfecks z. B. (Fig. 75), bestimmen sollte; so zerlege man dasselbe durch Diagonalen in Dreiecke; man suche hierauf den Schwerpunkt jedes dieser Dreiecke und denke sich in denselben Kräfte wirken, welche gleich den Gewichten der entsprechenden Dreiecke und also deren Flächen proportional sind. Der Angriffspunkt der Mittelkraft dieser Kräfte ist der gesuchte Schwerpunkt.

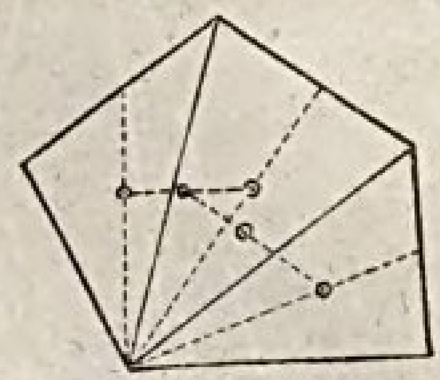


Fig. 75.

Um den Schwerpunkt irgend eines homogenen Prisma's zu finden (Fig. 76), denke man sich dasselbe parallel zu seinen Grundflächen in so dünne Platten zerschnitten, dass dieselben als Flächen im Sinne des §. 62 betrachtet werden können. Denkt man sich die Schwerpunkte aller dieser Platten gefunden, so liegen dieselben in der Verbindungslinie AB der Schwerpunkte der beiden Grundflächen. Hat man nun alle Platten gleich dick genommen, so sind ihre Gewichte sämmtlich einander gleich; zudem liegen die Angriffspunkte derselben auf der Linie AB in gleichen Entfernungen von einander; die Mittelkraft dieser Gewichte hat also ihren Angriffspunkt in der Mitte C von AB, und dieser Punkt C ist folglich der Schwerpunkt des Prismas.

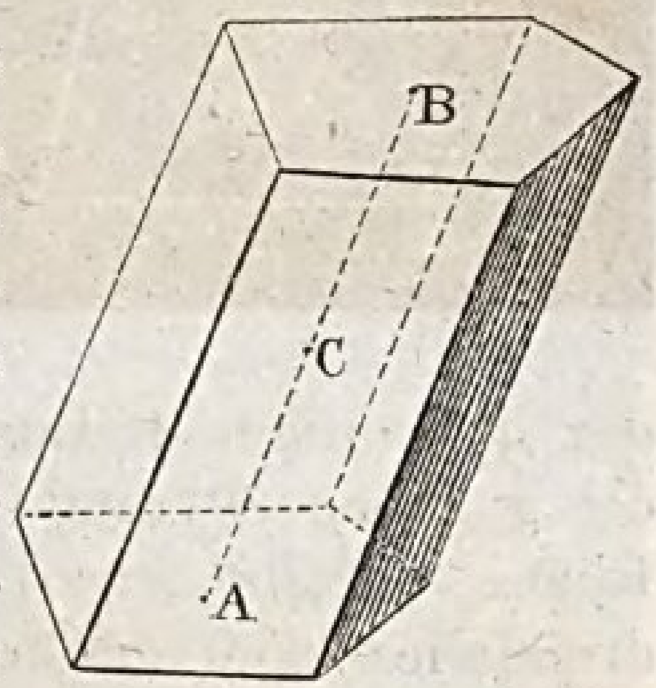


Fig. 76.

Der Schwerpunkt einer dreiseitigen Pyramide ABCD (Fig. 77) liegt, wie man leicht sieht, wenn man sich dieselbe wieder in Platten parallel zur Grundfläche ABC zerschnitten denkt, in der Verbindungslinie des Schwerpunkts S der Grundfläche mit der Spitze D; aus demselben Grund liegt er aber auch in der Verbindungslinie des Schwerpunktes S der Fläche ABD mit der gegenüberliegenden Spitze C, und daher im Durchschnittspunkte G beider Linien.

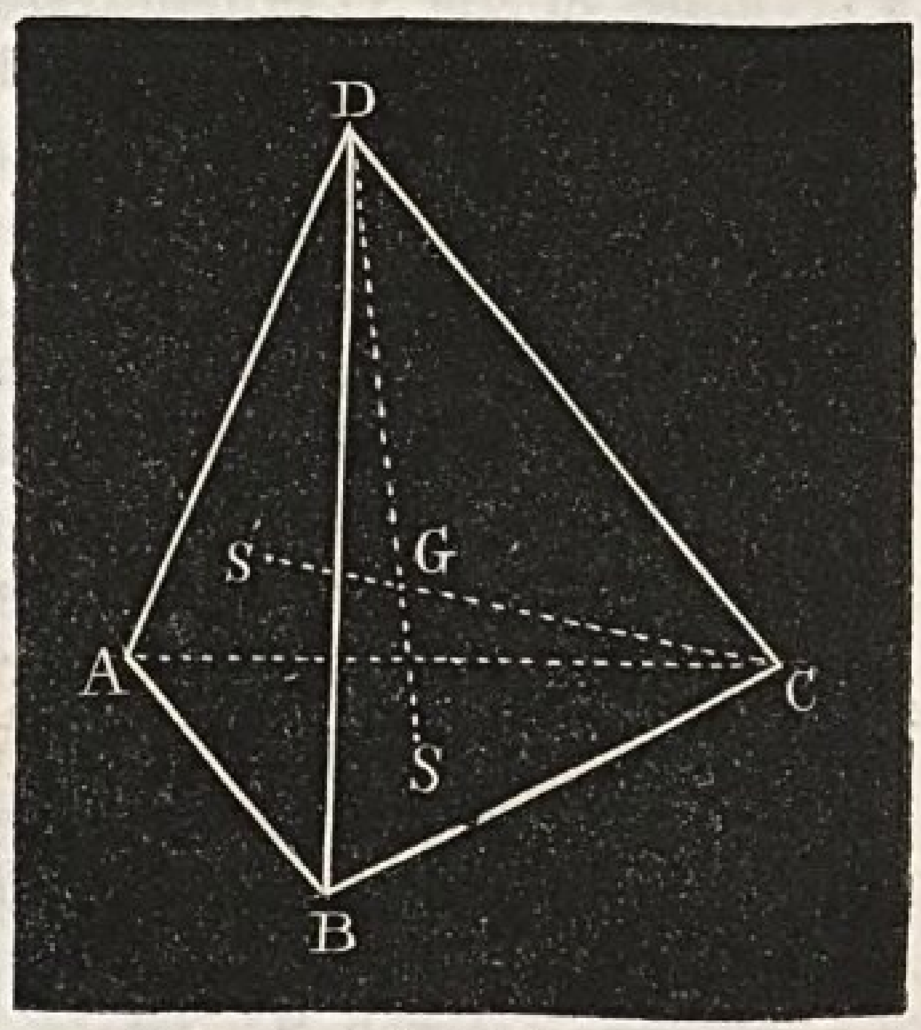


Fig. 77

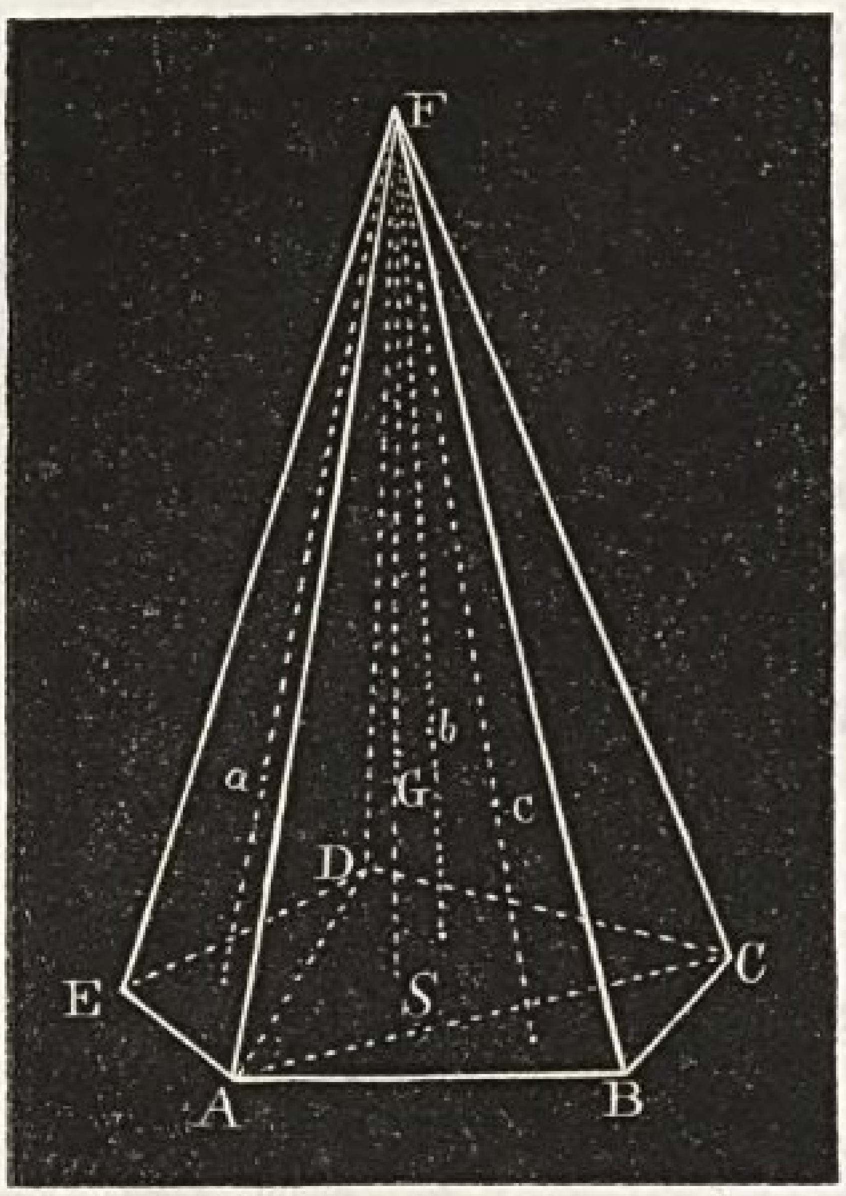


Fig. 78.

Die Geometrie zeigt, dass SG der dritte Theil von GD ist. Der Schwerpunkt einer dreiseitigen Pyramide liegt also in der Verbindungslinie des Schwerpunkts der Grundfläche mit der Spitze und zwar in demjenigen von den drei Punkten, welche diese Linie in 4 gleiche Theile theilen, der zunächst an der Grundfläche gelegen ist.

Der Schwerpunkt einer beliebigen vielseitigen Pyramide ABCDEF (Fig. 78) liegt, wie man leicht sieht, ebenfalls in der Verbindungslinie SF des Schwerpunktes der Grundfläche mit der Spitze. Ferner liegen die Schwerpunkte a, b, c der dreiseitigen Pyramiden ABCF, ACDF und ADEF, in welche die gegebene Pyramide zerlegt werden kann, sämmtlich in einer Ebene, parallel zur Grundfläche ABCDE, die von der Spitze F dreimal so weit entfernt ist, als von der Grundfläche. Der Angriffspunkt der Mittelkraft der in den Punkten a, b, c wirkenden Gewichte der dreiseitigen Pyramiden liegt also in der nämlichen Ebene. Dieser Angriffspunkt ist aber der gesuchte Schwerpunkt und liegt daher im Durchschnittspunkt G jener Ebene mit der Linie SF. Da aber wiederum GF dreimal so gross als SG ist, so folgt, dass auch der Schwerpunkt einer beliebigen vielseitigen Pyramide in der Verbindungslinie des Schwerpunktes der Grundfläche mit der gegenüberliegenden Spitze liegt, und zwar in demjenigen von den drei Punkten, durch welche diese Linie in vier gleiche Theile getheilt wird, der zunächst der Grundfläche befindlich ist.

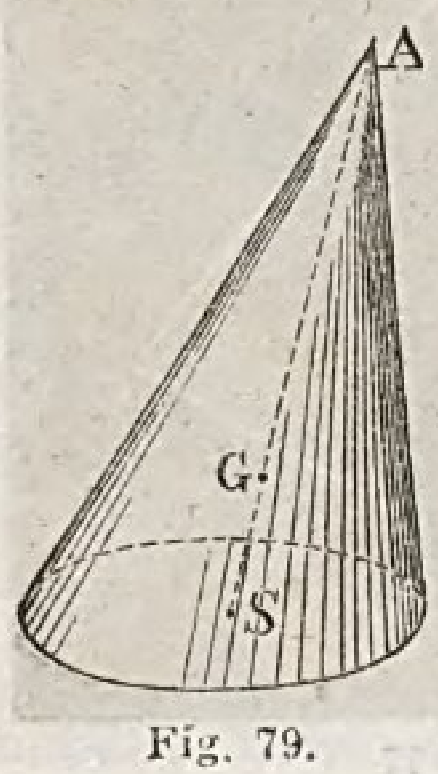


Fig. 79.

Das so eben gefundene Resultat gilt, wie gross auch die Seitenzahl der Grundfläche der Pyramide sein mag. Nun kann der Kreis als ein Vieleck von unendlich vielen Seiten, und folglich der Kegel (Fig. 79) als eine unendlichvielseitige Pyramide betrachtet werden. Es liegt daher der Schwerpunkt G des Kegels in der Verbindungslinie SA des Mittelpunkts der Grundfläche mit der Spitze und zwar so, dass SG der vierte Theil von SA ist.

§. 64. **Gleichgewicht eines schweren Körpers, welcher auf einer horizontalen Ebene aufruht.** — Wenn ein schwerer Körper auf einer horizontalen Ebene, auf einem Tisch oder auf dem Erdboden z. B., aufruht, so muss er, um sich in dieser Lage zu erhalten, ohne auf die eine oder andere Seite zu fallen, gewisse Bedingungen erfüllen, welche wir aus den allgemeinen Resultaten des §. 58 Nr. 4 und aus den neu gewonnenen Kenntnissen über den Schwerpunkt leicht herleiten können. Der Körper stütze sich in den Punkten A, B, C, D, E, F, G (Fig. 80), deren Anzahl oft sehr gross ist, gegen die Ebene. Aus diesen Punkten kann man immer ein Vieleck ABDEG bilden, das sie alle umschliesst, und welches keine einspringenden Winkel hat. Dabei werden in den meisten Fällen einige dieser Stützpunkte in das Innere des Vielecks fallen, wie hier die Punkte C und F, und folglich auf die Gestalt des Vielecks keinen Einfluss haben. Die Wirkung der Schwerkraft auf den Körper kann durch eine einzige vertikal abwärts wirkende Kraft gleich seinem Gewicht ersetzt werden, welche im Schwerpunkt des Körpers angreift und von selbst die Bedingung erfüllt, dass sie senkrecht gegen die horizontale Ebene gerichtet ist und den Körper gegen diese andrückt. Wenn die Richtung dieser Kraft durch das Innere des Vielecks geht, von dem wir eben gesprochen haben, so verharrt der Körper in seiner ursprünglichen Lage; wenn dagegen jene Richtung ausserhalb des Vielecks durch die horizontale Ebene hindurchgeht, so ist klar, dass der Körper umfallen und eine neue Lage einnehmen muss, in welcher sein Gleichgewicht möglich ist.

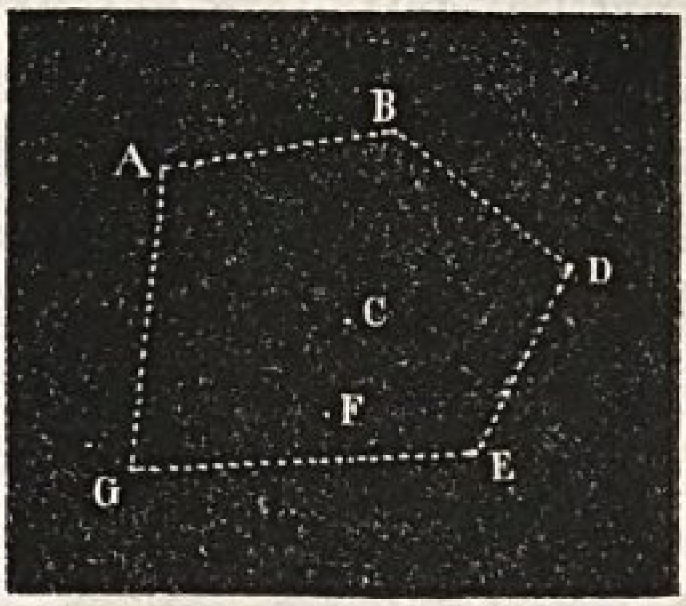


Fig. 80.

Ein schiefer Cylinder, welcher mit seiner Grundfläche auf einem Tisch steht (Fig. 81), bleibt in seiner Lage, wenn die Vertikale, welche von seinem Schwerpunkt herabgefällt wird, den Tisch innerhalb des Kreises trifft, welcher die Grundfläche des Cylinders bildet, und welcher hier an die Stelle des Vielecks tritt, von dem wir so eben gesprochen haben. Wenn aber der schiefe Cylinder eine grössere Länge hat, so kann es vorkommen, dass die Vertikale, welche von seinem Schwerpunkt herabgefällt wird, die

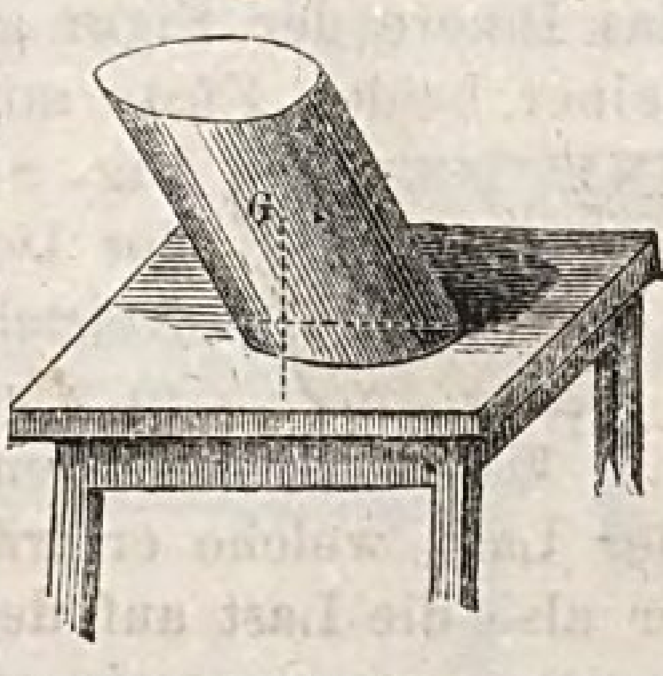


Fig 81

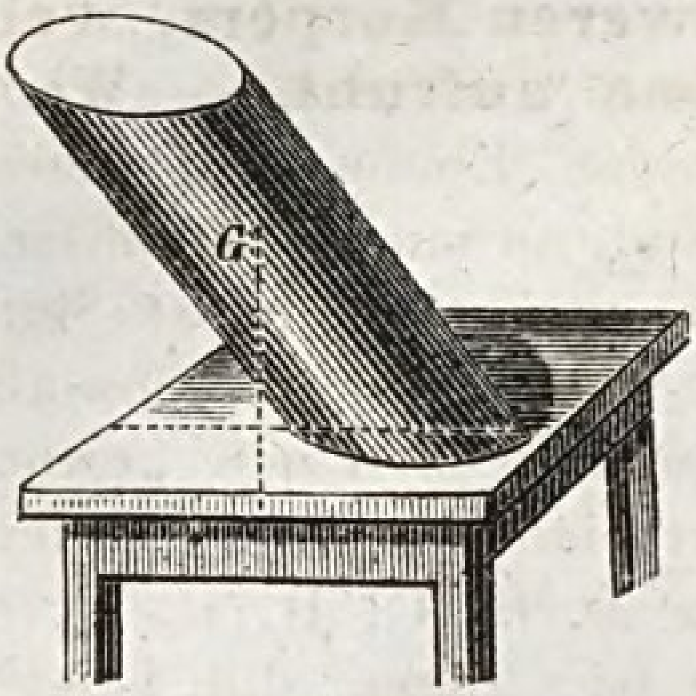


Fig. 82.

Fläche des Tisches in einem Punkt trifft, der ausserhalb der Grundfläche des Cylinders gelegen ist (Fig. 82); dann kann der Cylinder offenbar nicht in der durch die Figur bezeichneten Lage verharren; er muss nothwendig auf die Seite fallen.

Es gibt ein bekanntes Spielzeug der Kinder, welches aus einem Stück Hollundermark besteht, an dessen einem Ende ein metallener Knopf befestigt ist. Wenn man dasselbe der Länge nach auf den Tisch legt (Fig. 83), so richtet es sich alsbald wieder auf, und stellt sich vertikal mit dem Knopf nach unten. Es kommt dies daher, dass wegen der grossen Leichtigkeit des Hollundermarkes der Schwerpunkt eines solchen Körperchens ganz im Innern des Knopfes gelegen ist. Wenn es daher auf die Seite gelegt wird, so trifft die von seinem Schwerpunkt herabgefällte Vertikale, nicht mehr in das Innere der oben besprochenen Figur, welche durch die Stützpunkte auf dem Tisch gebildet wird und die sich hier auf die gerade Linie zusammenzieht, in welcher das Cylinderchen den Tisch berührt. Die Folge davon ist, dass die in dem Schwerpunkt angreifende Kraft durch Nichts gehindert ist, ihre Wirkung auszuüben; sie wird also, indem sie den Schwerpunkt herabzieht, das ganze Körperchen nöthigen, sich aufzurichten.

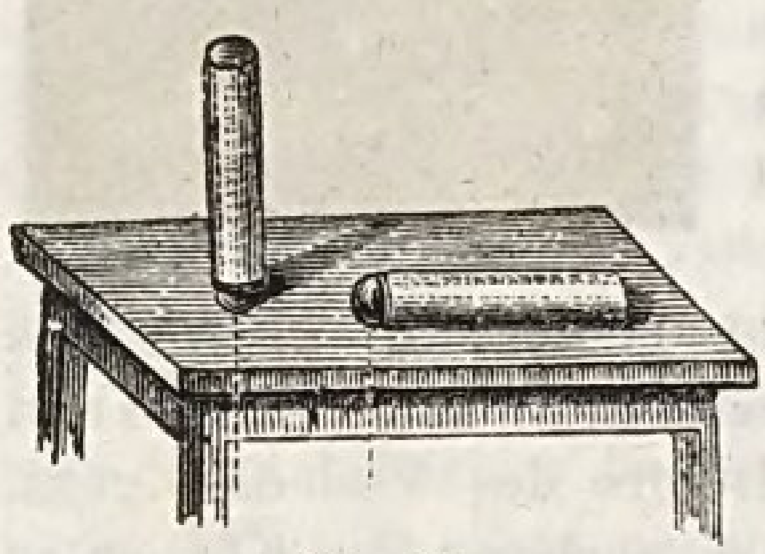


Fig. 83.

Damit ein Mensch, welcher aufrecht auf seinen Füssen steht, im Gleichgewicht bleibt, ist es nothwendig, dass die Vertikale, welche von seinem Schwerpunkt herabgefällt wird, durch das Innere der Figur gehe, welche aus den Berührungspunkten seiner beiden Füsse mit dem Boden gebildet werden kann. Die Fig. 84 zeigt die Gestalt dieser Fläche, welche der Deutlichkeit halber schraffirt ist. Wenn ein freistehender Mensch eine schwere Last trägt, so wird er eine solche Haltung annehmen, dass der gemeinsame Schwerpunkt seines Körpers und der Last, welche er trägt, der obigen Bedingung genügt; wenn er also die Last auf dem Rücken trägt, so wird er sich vorwärts beugen; wenn er sie mit der rechten Hand auf der Seite trägt,

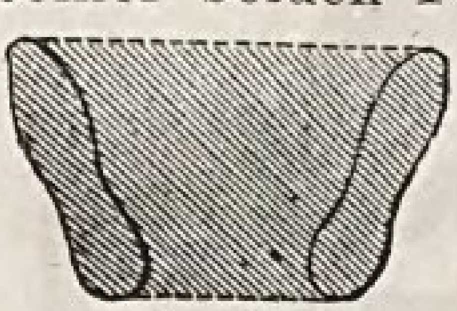


Fig. 84.

so wird er sich nach links hinüberneigen. Wenn Jemand, ohne seinen Platz zu verändern, einen etwas entfernten Gegenstand ergreifen will, so wird er seinen Arm ausstrecken und seinen ganzen Körper nach der Seite hin neigen, wo der Gegenstand sich befindet; zugleich aber wird er das eine Bein nach hinten ausstrecken, aus dem einfachen Grund, seinen Schwerpunkt in derjenigen Lage zu erhalten, welche zum Gleichgewicht seines Körpers erforderlich ist.

Eine Kugel berührt eine ebene Fläche, auf welcher sie liegt, stets in einem einzigen Punkt. Ihr Schwerpunkt, vorausgesetzt dass sie homogen ist, ist ihr Mittelpunkt. Wenn die Unterstützungsebene eine horizontale ist, so geht die vom Schwerpunkt herabgefällte Vertikale stets durch den Unterstützungspunkt der Kugel hindurch. Dieselbe ist also immer im Gleichgewicht. Wenn dagegen die Kugel auf einer schiefen, d. h. gegen den Horizont geneigten Ebene liegt, so geht die vom Mittelpunkt herabgefällte Senkrechte niemals durch ihren Berührungspunkt mit der Ebene hindurch. Die Kugel wird also für sich niemals auf der schiefen Ebene liegen bleiben, sondern stets dieselbe herabrollen.

§. 65. **Druck eines Körpers gegen seine Unterstützungspunkte.** — Ein schwerer Körper, welcher auf einer Horizontalebene aufruht, übt in jedem seiner Unterstützungspunkte einen Druck senkrecht gegen dieselbe aus. Die Mittelkraft aller dieser Drückungen ist offenbar das Gewicht des Körpers, dessen Angriffspunkt in den Schwerpunkt oder auch in jeden andern Punkt der durch ersteren gehenden Vertikallinie gelegt werden kann. Die einzelnen Drückungen selbst können, wie wir sehen werden, nur dann bestimmt werden, wenn die Anzahl der Unterstützungspunkte nicht grösser als drei ist und dieselben in letzterem Falle nicht in einer geraden Linie liegen.

Wenn der Körper nur in einem einzigen Punkt auf der Ebene aufruht und im Gleichgewicht ist, so ist klar, dass der Druck, welchen er in diesem einzigen Unterstützungspunkte ausübt, gleich seinem Gewicht sein muss.

Für den Fall, wo zwei Unterstützungspunkte vorhanden sind, nehmen wir als Beispiel den in Fig. 85 dargestellten Körper, welcher aus einer kreisrunden Scheibe und einem cylindrischen Stabe besteht, welcher senkrecht auf dieser Scheibe in ihrem Mittelpunkt befestigt ist.

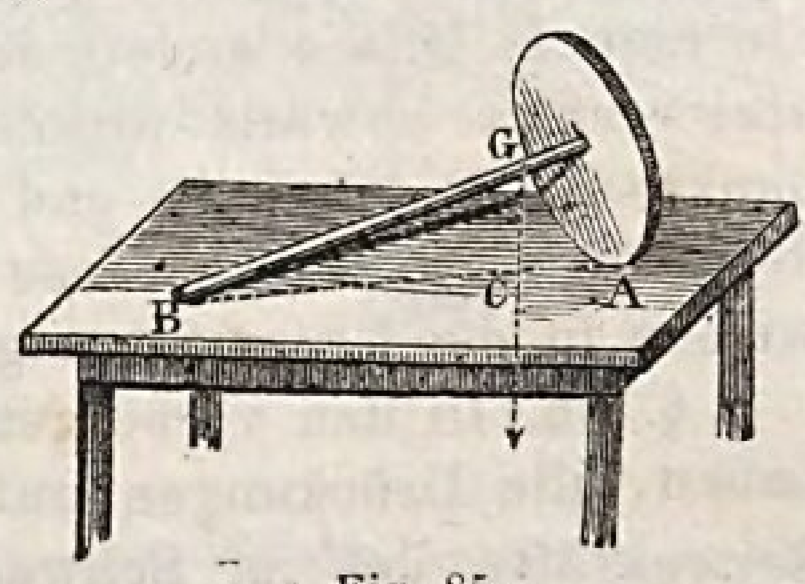


Fig. 85.

Wenn dieser Körper auf die Seite gelegt wird, so ruht er blos in zwei Punkten A und B auf, und für das Gleichgewicht ist erforderlich, dass die Vertikale, welche von seinem Schwerpunkt G herabgefällt wird, der Horizontalebene in einem Punkt C der Linie AB begegnet. Das Gewicht des Körpers ist eine Kraft, die nach den Vertikalen GC wirkt und deren Angriffspunkt wir für den Augenblick auch nach C verlegen können. Wir können diese Kraft so ansehen, als wenn sie aus der Zusammenwirkung zweier anderer vertikaler Kräfte hervorgegangen wäre, welche in den Punkten A und B angreifen, und deren Grösse leicht gefunden werden kann. Man darf zu diesem Zwecke nur das Gewicht des Körpers in zwei Theile theilen, welche dasselbe Verhältniss zu einander haben, wie die Entfernungen AC und CB; wenn dann AC kleiner als CB ist, so ist die grössere der eben erhaltenen beiden Kräfte die in A angreifende Seitenkraft, während die kleinere derselben an dem Punkt B angebracht werden muss. Diese beiden Seitenkräfte sind die Drückungen, welche der Körper in seinen beiden Unterstützungspunkten ausübt.

Wenn es sich um einen Körper handelt, welcher in drei Punkten A, B, C (Fig. 86), die nicht in gerader Linie liegen, auf einer Ebene aufruht, so können die Drückungen, welche er in seinen Unterstützungspunkten ausübt, auf folgende Art gefunden werden. Die Vertikale GO, welche durch den Schwerpunkt G geht, begegnet der Horizontalebene in einem Punkt O, welcher im Innern des Dreiecks ABC gelegen sein muss. Das Gewicht des Körpers, welches in dem Punkte G angebracht werden muss, kann so betrachtet werden, als ob es in dem Punkte O wirkte und aus der Zusammensetzung zweier vertikaler Kräfte hervorgegangen wäre, von denen die eine in A, die andere in D angreift. Diese letztere Kraft kann selbst wieder in zwei vertikale Kräfte zerlegt werden, von denen die eine in B, die andere in C wirkt; man hat auf diese Weise drei vertikal abwärts wirkende Kräfte gefunden, deren Angriffspunkte A, B, C sind, und welche als Mittelkraft das Gewicht des Körpers haben. Diese drei Kräfte sind die Drückungen, welche in den Unterstützungspunkten A, B, C ausgeübt werden.

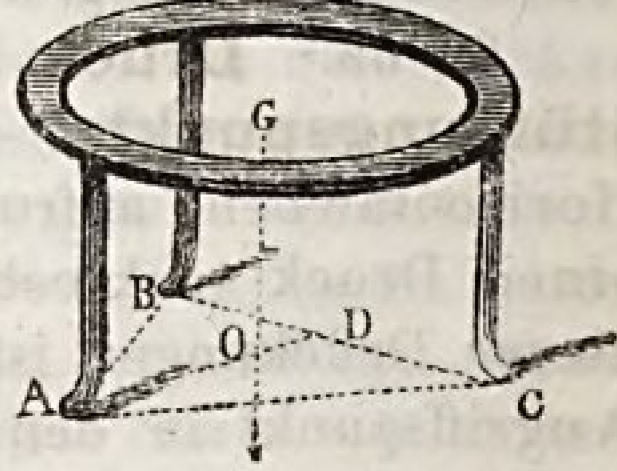


Fig. 86.

§. 66. In den vorhergehenden Fällen sind, wie wir gesehen haben, die Drückungen auf die Unterstützungspunkte, als die Seitenkräfte des im Schwerpunkte angreifenden Gewichts des

Körpers, vollkommen bestimmt; wenn aber die drei Unterstützungspunkte eines Körpers in gerader Linie gelegen sind, oder wenn die Zahl der Unterstützungspunkte grösser als drei ist, so ist es nicht mehr möglich, aus der Lage des Schwerpunkts des Körpers allein die Drückungen auf die Unterstützungspunkte zu bestimmen. Es seien A, B, C (Fig. 87) die drei in gerader Linie gelegenen Unterstützungspunkte eines Körpers und O der Punkt, wo die vom Schwerpunkt herabgefällte Vertikale jene Linie trifft, so kann man sich in O die Kraft Q gleich dem Gewichte des Körpers wirkend denken. Die in A, B, C ausgeübten Drückungen müssen die Seitenkräfte dieser Kraft sein. Nun kann die Kraft Q zunächst nur in zwei Seitenkräfte zerlegt werden, und es tritt hier schon eine Unbestimmtheit insofern ein, als es willkürlich erscheint, wo diese Seitenkräfte angreifen sollen, in den Punkten A und C, oder A und B, oder B und C. Gesetzt, Q sei in zwei Seitenkräfte zerlegt, die in A und C angreifen, so bleibt noch zu bestimmen, wie viel von den Drückungen in A und C auf B übertragen wird. Diese Bestimmung ist aber nicht ausführbar. Der Druck in B kann möglicherweise sehr klein sein, und es haben dann die Punkte A und C den ganzen Druck auszuhalten; er kann aber auch ziemlich gross sein, sodass die Punkte A und C fast nichts zu tragen haben.

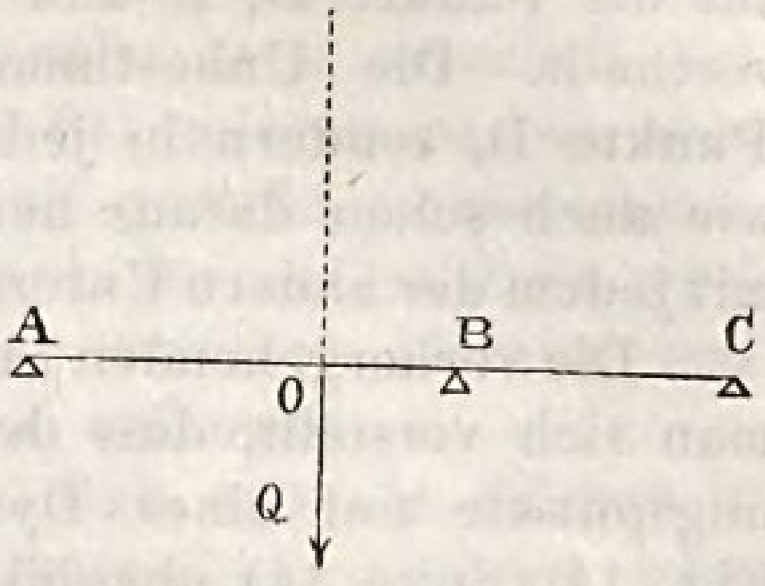


Fig. 87.

Etwas Aehnliches findet statt, wenn der Körper, z. B. ein Tisch (Fig. 88), in vier Unterstützungspunkten auf der Horizontalebene aufruht. Denken wir uns den Punkt, wo die vom Schwerpunkt herabgefällte Vertikale die Horizontalebene trifft, mit dem Punkt A z. B. verbunden, und die Verbindungslinie verlängert, bis sie die Linie BC schneidet, so kann das Gewicht des Körpers in zwei Seitenkräfte zerlegt werden, von denen die eine in diesem Schnittpunkt, die andere in dem Punkt A angreift. Die erstere kann wieder in zwei in B und C angreifende Seitenkräfte zerlegt werden, so-

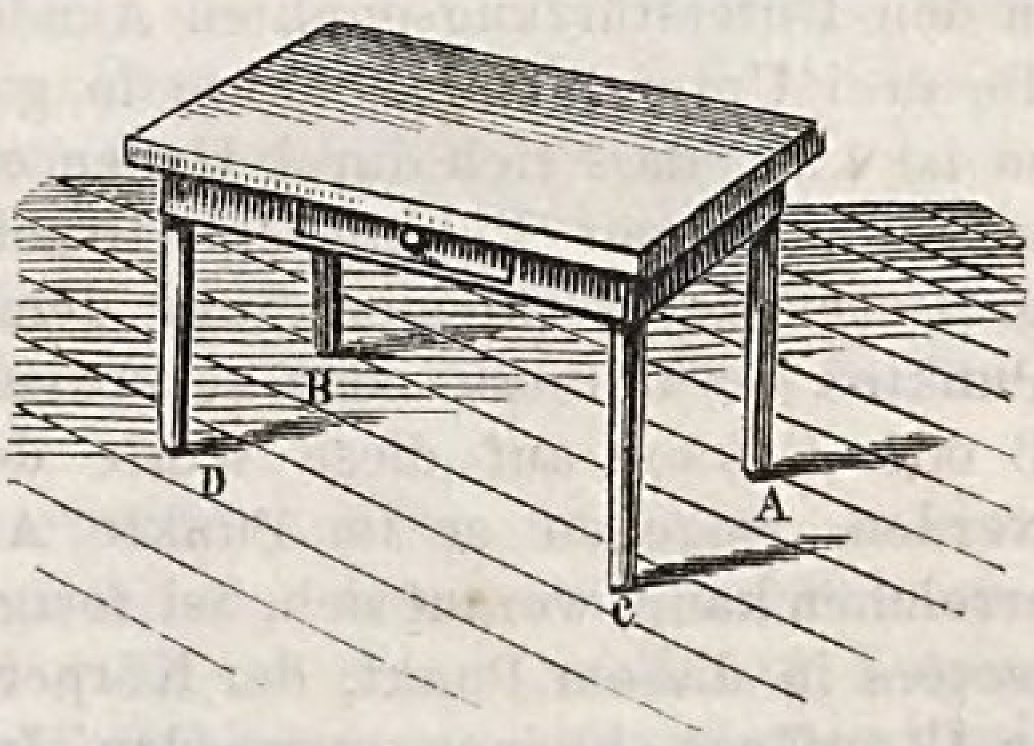


Fig. 88.

dass nur noch zu bestimmen bleibt, wie viel von den Drückungen in A, B, C auf den Punkt D übertragen wird. Diese Bestimmung ist aber wieder nicht möglich. Der Druck in D kann sehr klein sein, dann haben die Punkte A, B, C fast das ganze Gewicht des Körpers zu tragen; oder er kann gross sein, sodass sich der Gesammtdruck hauptsächlich auf die Punkte D und A, oder auch auf die Punkte D, A und C, oder auch auf D, A und B u. s. w. vertheilt. Die Unbestimmtheit tritt also nicht blos bei dem Punkte D, sondern in jedem der vier Unterstützungspunkte ein, wie auch schon daraus hervorgeht, dass man, wie hier mit A, so mit jedem der andern Unterstützungspunkte hätte beginnen können.

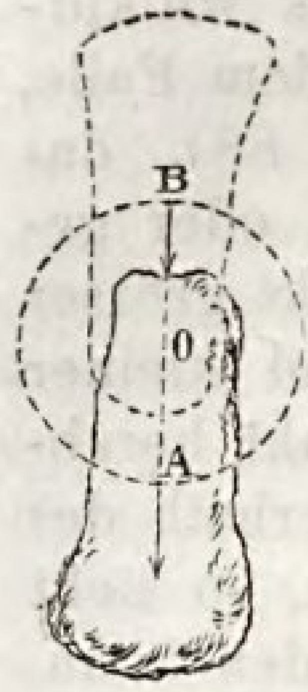
Die vorhergehenden Betrachtungen werden noch klarer, wenn man sich vorstellt, dass der Körper in jedem seiner Unterstützungspunkte auf einer Dynamometerfeder, etwa ähnlich der in Fig. 14 (Seite 44) abgebildeten, stehe, die den in diesem Punkt ausgeübten Druck zu messen gestattet. Dann wird offenbar in dem Falle, wo blos ein Unterstützungspunkt vorhanden ist, die Dynamometerfeder unter allen Verhältnissen einen Druck gleich dem Gewichte des Körpers anzeigen. In dem Falle von zwei Unterstützungspunkten A und B (Fig. 85) werden die in diesen Punkten angebrachten Dynamometerfedern stets die oben gefundenen Seitenkräfte des Gewichts als Drückungen geben; denkt man sich die eine Feder, etwa die bei A, etwas gehoben oder gesenkt, so ist klar, dass sich der Körper in entsprechendem Maasse um B drehen wird, während die Drückungen auf beide Unterstützungspunkte unverändert bleiben. — Wenn drei Unterstützungspunkte vorhanden sind, die nicht in gerader Linie liegen (Fig. 86), und man denkt sich das Dynamometer in einem dieser Punkte, A z. B., etwas gehoben oder gesenkt, so dreht sich der Körper entsprechend um die Linie BC, ohne dass die Drückungen in den Unterstützungspunkten Aenderungen erleiden. Wenn aber die drei Unterstützungspunkte in gerader Linie liegen (Fig. 87), so ist klar, dass sich durch Heben oder Senken des Dynamometers in einem dieser Punkte der Druck in demselben beliebig vergrössern oder verkleinern, und dem entsprechend in den andern Punkten verkleinern oder vergrössern lässt. Ja in dem Punkte B oder C kann auf diese Weise der Druck sogar Null gemacht werden, wogegen er im Punkte A nur ein gewisses Minimum erreichen kann, worauf sich, bei fortgesetzter Senkung des Dynamometers in diesem Punkt, der Körper um B dreht und der Druck in C anfängt, kleiner zu werden. In solcher Weise vertheilt man bei Locomotiven mit drei oder mehr Achsen in der That durch

Anspannen oder Nachlassen der Tragfedern den Druck willkürlich auf diese Achsen. — Wenn man sich endlich in dem Falle, wo vier Unterstützungspunkte vorhanden sind (Fig. 88), das Dynamometer unter einem derselben, A z. B., gehoben oder gesenkt denkt, so wird dadurch der Druck in diesem Punkt grösser oder kleiner und in den andern Punkten entsprechend kleiner oder grösser. Wenn der Punkt, wo die vom Schwerpunkt herabgefällte Vertikale die Horizontalebene trifft, noch innerhalb des Dreiecks BCD oder auch auf der Linie BC gelegen ist, so sieht man, dass das Dynamometer in A so weit gesenkt werden kann, bis der Druck in diesem Punkte Null wird. Im andern Falle wird dieser Druck blos ein gewisses Minimum erreichen können, und darauf der Tisch sich um BC zu drehen anfangen.

Alles, was im Allgemeinen für den Fall, wo ein Körper in mehr als drei Punkten auf einer Horizontalebene aufruht, oder wo schon drei Unterstützungspunkte in einer geraden Linie liegen, gesagt werden kann, besteht darin, dass die Summe sämmtlicher Drückungen auf die Unterstützungspunkte gleich dem Gewicht des Körpers ist; die Grösse dieser Drückungen selbst ist zwar in jedem speciellen Fall eine bestimmte, aber sie hängt von rein zufälligen Eigenschaften der Horizontalebene in der Nähe der Unterstützungspunkte ab und kann daher im Allgemeinen nicht bestimmt werden.

§. 67. Gleichgewicht eines schweren Körpers, welcher sich blos um eine horizontale Achse drehen kann. — Wenn ein fester Körper keine andere Bewegung als eine Drehung um eine horizontale Achse annehmen kann, wie dies z. B. bei einem Wasserrade oder bei einem Schleifsteine der Fall ist, so ist die Lage seines Schwerpunkts von grosser Bedeutung. Wenn dieser Punkt genau auf der, in Gedanken durch den Körper gelegten, geraden Linie gelegen ist, um welche die Drehung ausgeführt wird, und welche wir die Drehungsachse nennen, so bleibt der Körper in allen Lagen im Gleichgewicht, welche ihm um diese Achse gegeben werden können; denn die einzige Kraft, welche, wie vorausgesetzt, auf ihn wirkt, hat ihren Angriffspunkt in der Drehungsachse und daher in keiner seiner Lagen das Bestreben, ihn zu drehen.

Wenn dagegen der Schwerpunkt A (Fig. 89) nicht in der Drehungsachse gelegen ist, so ist der nur dem Einfluss der Schwerkraft unterworfene Körper blos in zwei verschiedenen Lagen im Gleichgewicht: wenn sich sein Schwerpunkt entweder vertikal unter der Drehungsachse in A, oder vertikal über derselben in B


Fig. 89.

befindet. In allen andern Fällen dagegen, wo der Schwerpunkt anderswo, als in den Punkten A und B gelegen ist, sucht ihn die Kraft, welche an ihm wirkt, nach abwärts zu ziehen, indem sie den Körper nach rechts oder links bewegt. Man sieht daraus, dass der Schwerpunkt in A oder B liegen muss, damit sich der Körper unter dem alleinigen Einfluss der Schwerkraft weder nach links noch nach rechts drehen kann. Zugleich ist klar, dass die Gleichgewichtslage stabil ist, wenn der Schwerpunkt vertikal unter, labil dagegen, wenn er vertikal über der Drehungsachse liegt.

Wenn die Wirkung der Schwerkraft auf die Drehung, welche ein Körper um eine horizontale Achse erhalten soll, keinen Einfluss haben soll, so muss man es so einrichten, dass der Schwerpunkt des Körpers genau in dieser Achse gelegen ist. Dies ist der Grund, warum die Zeiger von grossen Thurmuhren jenseits des Mittelpunkts des Zifferblatts kurze aber schwere Verlängerungen erhalten, welche so gewählt werden, dass der Schwerpunkt des ganzen Zeigers auf der Achse desselben gelegen ist; wenn man es vermeiden will, dass sich der Zeiger nach beiden Seiten vom Mittelpunkt des Zifferblattes aus erstreckt, so befestigt man an dem Stabe, welcher ihm als Achse dient, hinter dem Zifferblatt ein Gegengewicht, das denselben Zweck zu erfüllen hat. In Werkstätten, wo grosse Stücke von Guss- oder Schmiedeisen abgedreht werden sollen, fügt man denselben, wenn sie in die Drehbank eingespannt werden, wo nöthig noch Massen bei, welche lediglich den Zweck haben, den Schwerpunkt auf die Drehungsachse zu verlegen.

IV. Betrachtung einiger Maschinen unter dem Gesichtspunkt des Gleichgewichts der Kräfte, welche auf sie wirken.

§. 68. **Der Hebel.** — Im Allgemeinen kann man jeden um eine Achse drehbaren Körper, auf welchen Kräfte wirken, die eine drehende Bewegung zu bewerkstelligen suchen, einen Hebel nennen. Für einen solchen Körper haben wir bereits in §. 58 Nr. 3 die allgemeinen Bedingungen des Gleichgewichts abgehandelt. Für gewöhnlich beschränkt man aber die Benennung Hebel auf mehr stangenförmige Körper, die sich um wirkliche oder blos gedachte Achsen drehen können, und auf welche meistens

blos zwei, in selteneren Fällen mehr Kräfte wirken. Es gibt im praktischen Leben unzählige Beispiele von Hebeln, auch in diesem beschränkten Sinn. An dem Hebeisen, dem Waagebalken, der Scheere, der Zange u. s. w. wird man leicht obige Merkmale für den Hebel auffinden. — Der grossen Wichtigkeit des Hebels im praktischen Leben wegen, ist es nothwendig, dass wir hier näher auf ihn eingehen und seine Anwendung in einigen besondern Fällen betrachten.

Das Hebeisen ist eine Stange AB (Figur 90), mit deren Hilfe ein schwerer Körper M, der auf ihrem einen Ende A aufliegt, gehoben wird, indem man auf das andere Ende B drückt. Diese Stange stützt sich in C gegen die Kante einer Unterlage und dreht sich um dieselbe, wenn die in Anwendung gebrachte Kraft gross genug ist. Setzen wir voraus, dass der Körper M, nachdem er ein wenig gehoben worden ist, in seiner neuen Lage mit Hilfe des Hebeisens im Gleichgewicht gehalten wird, so befindet sich dasselbe unter der Einwirkung zweier Kräfte: die eine derselben ist der Druck, welchen der Körper M in A ausübt, und die andere ist die Kraft, welche in B angewendet werden muss, um den Körper M am Zurückfallen zu hindern.

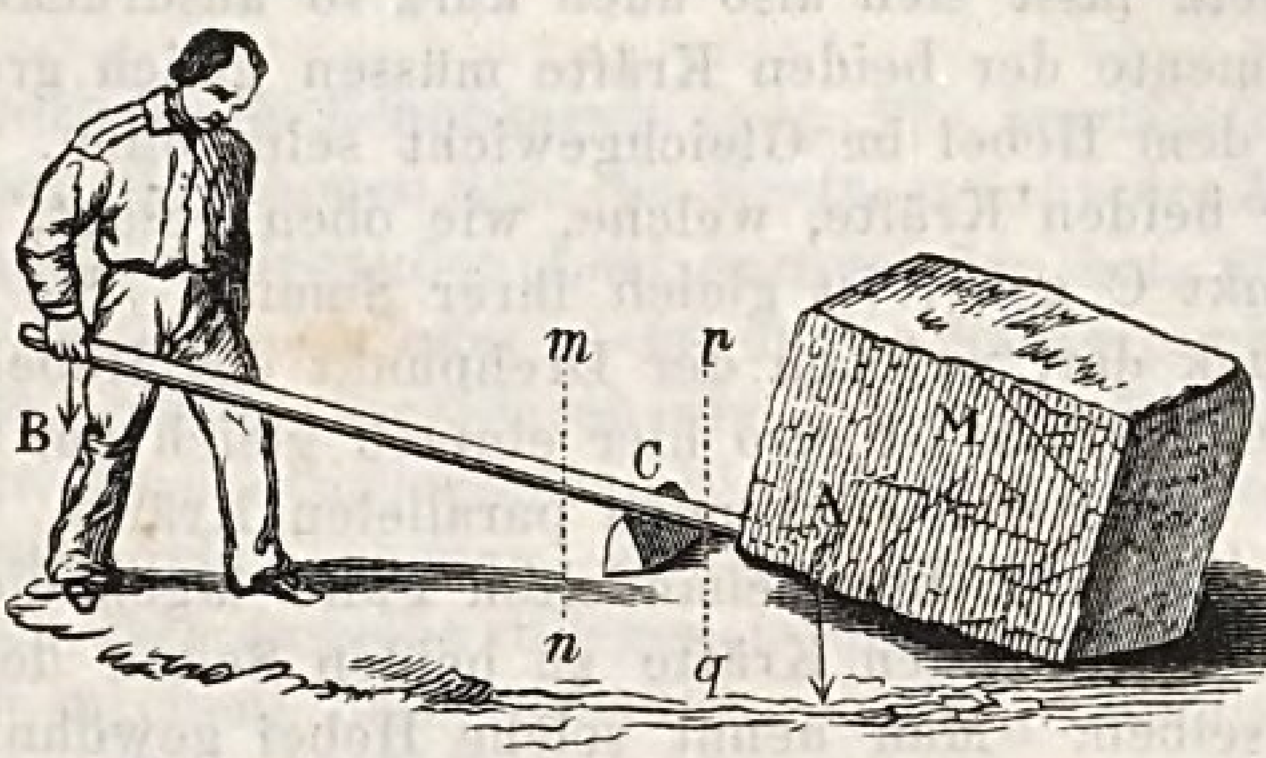


Fig. 90.

Diese beiden Kräfte, welche wir als parallel betrachten können, können nach dem Vorhergehenden durch eine einzige Kraft ersetzt werden, welche dieselbe Wirkung wie sie auf den Hebel hervorbringt. Diese eine Kraft muss aber durch den Punkt C gehen; denn wäre dies nicht der Fall, ginge ihre Richtung links oder rechts, nach der Linie *mn* oder *pq* von C vorbei, so müsste sich der Hebel unter der Wirkung dieser einzigen an ihm angebrachten Kraft nach links oder rechts um den Punkt C drehen. Das Gleichgewicht des Hebels unter der gleichzeitigen Einwirkung der beiden Kräfte, welche in A und B an ihm wirken, erfordert also, dass die Mittelkraft dieser zwei Kräfte durch C gehen muss. Dazu ist es aber, wie wir jetzt wissen, nöthig, dass die beiden

Kräfte den Entfernungen AC und BC, welche man ihre Hebelarme nennt, umgekehrt proportional sind. Wenn also BC 10 oder 100 oder 1000mal grösser ist als AC, so darf die in B ausgeübte Kraft 10 oder 100 oder 1000mal kleiner sein als der in A auf den Hebel wirkende Druck, welchem das Gleichgewicht gehalten werden soll. — Daraus ist ausserdem leicht zu folgern, dass, wenn man jede der beiden Kräfte mit ihrem Hebelarm multiplicirt, das gleiche Resultat herauskommen muss. Man nennt aber das Product aus einer Kraft in ihren Hebelarm das statische Moment dieser Kraft. Das oben gefundene Hebelgesetz lässt sich also auch kurz so ausdrücken: Die statischen Momente der beiden Kräfte müssen gleich gross sein, wenn sie an dem Hebel im Gleichgewicht sein sollen. — Die Mittelkraft der beiden Kräfte, welche, wie oben gesagt, alsdann durch den Punkt C geht, ist gleich ihrer Summe. Sie stellt offenbar den Druck dar, welchen der Drehpunkt des Hebels zu erleiden hat. Dieser Druck ist also hier einfach gleich der Summe der beiden auf den Hebel wirkenden parallelen Kräfte.

In dem eben behandelten Falle lagen die beiden, an dem Hebel wirkenden Kräfte zu beiden Seiten des Drehungspunktes desselben. Man nennt solche Hebel gewöhnlich zweiarmige zum Unterschiede von denjenigen, wo sich, wie in Fig. 91, beide parallele Kräfte auf einerlei Seite des Drehungspunktes C befinden und dann natürlich entgegengesetzt gerichtet sind. Es kommt diese Form des Hebels, in welcher man ihn gewöhnlich, aber eigentlich unpassend, einarmig nennt, sehr häufig vor. Die Fusstritte, welche zur Bewegung kleinerer Drehbänke oder der Spinnrädchen mit dem Fusse dienen, die Nussknacker, Tabakschneidemesser und endlich der Schubkarren (Fig. 92) sind Beispiele für diese Hebel-

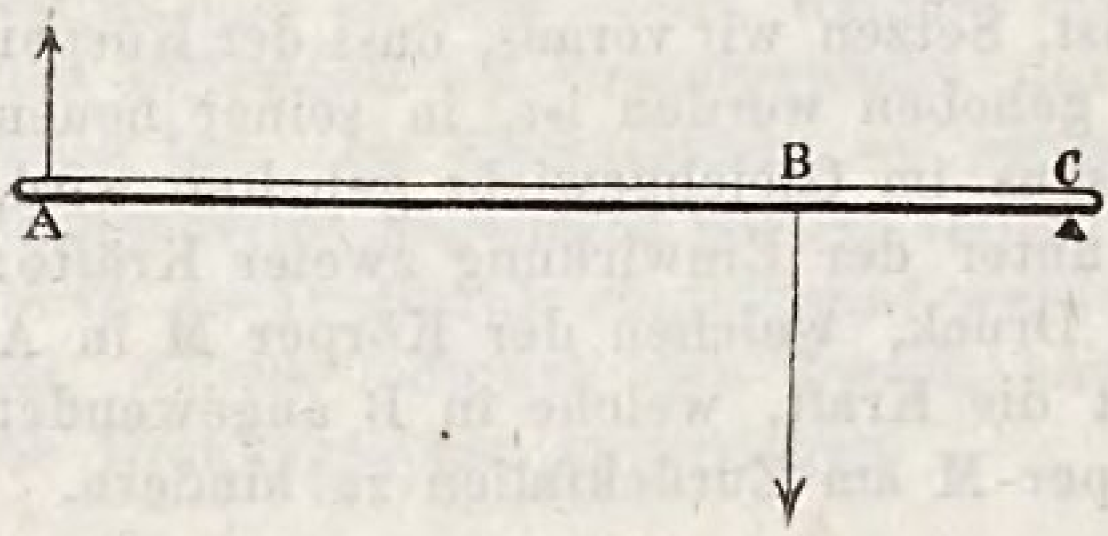


Fig. 91.



Fig. 92.

form. Es ist leicht, die Bedingungen des Gleichgewichts auch für diese aufzufinden. Die Mittelkraft der beiden parallelen und entgegengesetzten Kräfte, die hier gleich ihrer Differenz ist, muss offenbar wieder durch den Drehungspunkt C gehen, wenn Gleichgewicht stattfinden soll, und dies ist nach §. 47 nur dann der Fall, wenn sie sich umgekehrt wie ihre Entfernungen AC und BC vom Drehungspunkt oder, wie man diese Entfernungen auch hier nennt, umgekehrt wie ihre Hebelarme verhalten. Dann sind die Producte aus ihnen und ihren Hebelarmen, ihre statischen Momente, einander gleich. — Der von beiden Kräften in Gemeinschaft auf den Drehungspunkt ausgeübte Druck ist gleich ihrer Differenz.

Was noch speziell den Schubkarren (Fig. 92) betrifft, so ist nach dem oben ausgesprochenen Satz die Kraft, welche der Mann zum Heben der auf ihm liegenden Last anzuwenden hat, um so kleiner, je näher die letztere, oder vielmehr ihr Schwerpunkt M, der Drehungsachse, welche hier durch die Achse des Rädchens gebildet wird, liegt. Es sind daher solche Einrichtungen des Schubkarrens, welche es möglich machen, die Last nahe an das Rad oder vielleicht ganz über dasselbe zu legen, insoferne von Vortheil, als sie es möglich machen, dass verhältnissmässig grosse Lasten von einem einzigen Mann befördert werden können.

Es ist übrigens nicht immer der Fall, dass der Hebel, wie bisher vorausgesetzt, geradlinig und die beiden auf ihn wirkenden Kräfte parallel sind. Wenn er an seinem Drehungspunkte gebrochen (Winkelhebel, Fig. 93) oder ganz krummlinig ist (Fig. 94) und wenn die an ihm thätigen Kräfte nach beliebigen Richtungen hin wirken, so sind die Bedingungen für sein Gleichgewicht immer noch sehr leicht aufzufinden. Setzen wir voraus, die beiden in A und B (Fig. 94) thätigen Kräfte liegen in einer auf der Drehungsachse senkrechten Ebene (der allgemeinere

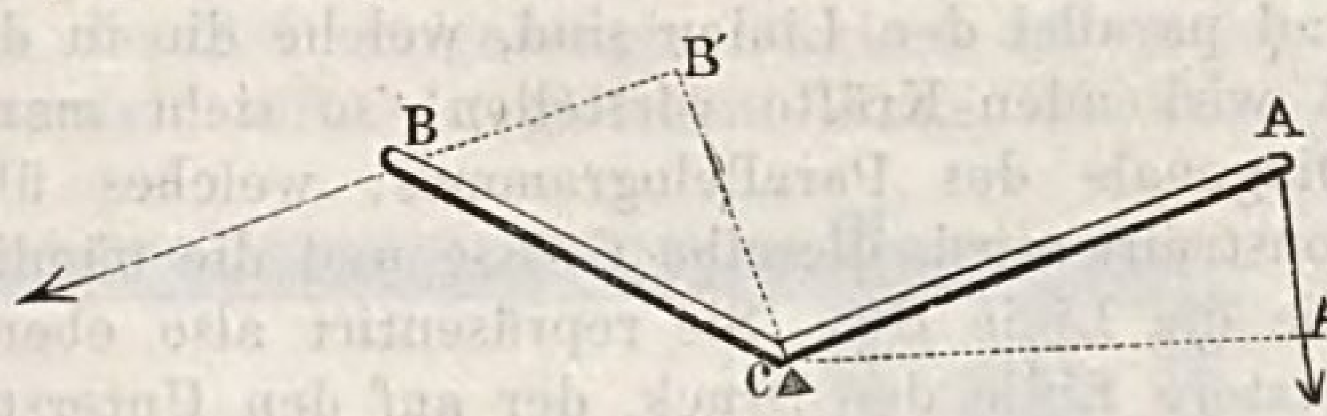


Fig. 93.

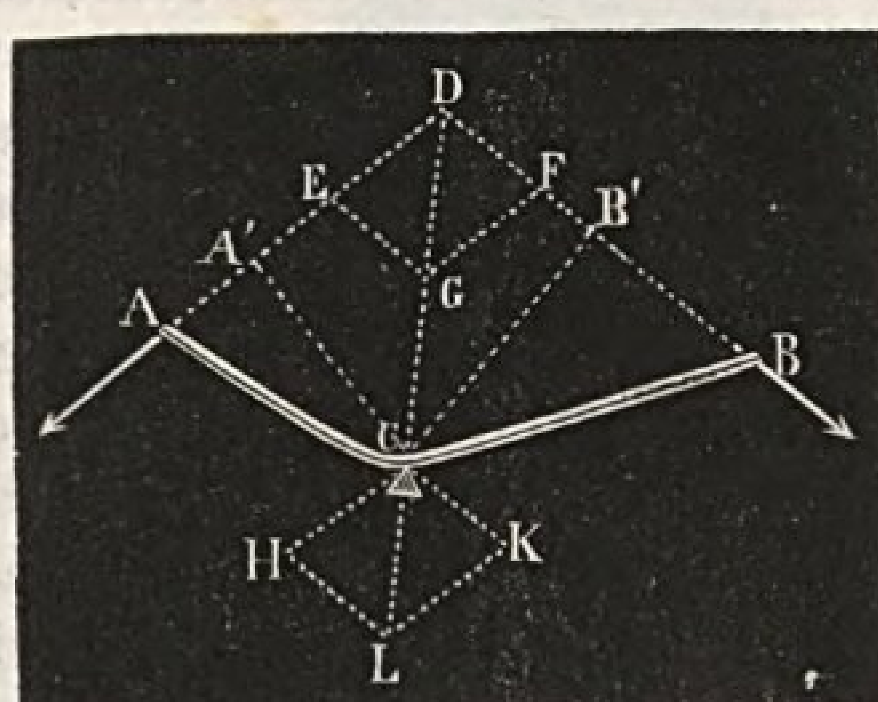


Fig. 94.

Fall, wo dies nicht erfüllt ist, ist leicht nach dem, was in §. 58 über Körper, die sich um feste Achsen drehen, gesagt wurde, zu ergänzen) und schneiden sich daher, verlängert, in einem Punkte D. Man denke sich nun, wie dies ja erlaubt ist, die Angriffspunkte der beiden in A und B wirkenden Kräfte in den Punkt D verlegt und von diesem Punkt aus die Linien DE und DF gleich den Grössen dieser beiden Kräfte aufgetragen, so ist die Diagonale DG des Parallelogramms DEGF die Resultante der Kräfte. Die Richtung dieser Resultante muss durch den Unterstützungspunkt C gehen, weil sie ja ohne dieses den Hebel nach rechts oder links zu drehen suchen würde. Dies ist aber nach einer bekannten geometrischen Eigenschaft des Parallelogramms der Fall, wenn sich die Seiten desselben, also hier die gegebenen Kräfte, umgekehrt wie die von irgend einem Punkte C in der Diagonale des Parallelogramms oder deren Verlängerung gefällten Senkrechten CA′, CB′ (s. auch Fig. 93) auf jenen Seiten verhalten. Nennt man diese Senkrechten wieder die Hebelarme der Kräfte, so gilt auch hier das Gleichgewichtsgesetz, dass sich die Kräfte umgekehrt, wie ihre Hebelarme verhalten oder dass ihre statischen Momente einander gleich sein müssen. Die durch die Diagonale DG repräsentirte Mittelkraft ist offenbar der Druck, welchen der Hebel auf seinen Unterstützungspunkt ausübt. Wenn man durch den Punkt C zwei Linien CH, CK zieht, welche bezüglich gleich und parallel den Linien sind, welche die in den Punkten A und B wirkenden Kräfte vorstellen, so sieht man leicht, dass die Diagonale des Parallelogrammes, welches über diesen Linien construirt wird, dieselbe Grösse und die nämliche Richtung hat, wie die Linie DG. Sie repräsentirt also eben so gut wie diese letztere Linie den Druck, der auf den Unterstützungspunkt ausgeübt wird. Gewöhnlich construirt man das Parallelogramm CHLK, um den Druck auf den Unterstützungspunkt zu bestimmen.

§. 69. Wir haben bisher das Gewicht des Hebels selbst ganz vernachlässigt. In den meisten Fällen der Anwendung ist es, gegen die wirkenden Kräfte gehalten, in der That so klein, dass es gegen diese ausser Acht gelassen werden kann. Wo dies aber nicht mehr der Fall ist, da darf man nur das Gewicht des Hebels als eine in seinem Schwerpunkt angreifende Kraft einführen, erhält aber dann mindestens drei Kräfte, die an dem Hebel thätig sind, während wir bisher immer blos von zweien sprachen. Es ist daher nothwendig, dass wir auch noch auf den Fall näher eingehen, wo auf einen Hebel mehr als zwei Kräfte

wirken und die Bedingungen des Gleichgewichts für dieselben aufstellen. Der Einfachheit halber soll vorausgesetzt werden, dass sämmtliche Kräfte in einer auf der Drehungsachse des Hebels senkrechten Ebene liegen, deren Durchschnitt mit der Drehungsachse kurz als Drehpunkt bezeichnet werden mag. Dann ist sofort klar, dass der Hebel nur dann im Gleichgewicht ist, wenn die Resultante sämmtlicher Kräfte durch den Drehungspunkt hindurch geht, und diese Resultante stellt dann zugleich den Druck auf die Drehungsachse der Grösse und Richtung nach vor. Ob jene Bedingung aber erfüllt ist, sieht man, nach einem ähnlichen Satz wie der vorhin bei zwei Kräften gebrauchte war, schon ein, ohne dass man die Resultante selbst aufsucht. Es müssen nämlich die statischen Momente aller der Kräfte, die nach der einen Richtung zu drehen suchen, insgesammt gleich sein der Summe der statischen Momente der Kräfte, die nach der andern Seite zu drehen streben, sämmtliche statische Momente in Bezug auf den Drehungspunkt genommen, d. h. die Kräfte mit der vom Drehungspunkt auf ihre Richtung gefällten Senkrechten multiplicirt. Und in diesem Satze ist denn nun das allgemeine Hebelgesetz enthalten. Ein Beispiel möge seine Anwendung erläutern.

Das Sicherheitsventil, von dem wir später ausführlicher sprechen werden, ist ein um den Punkt C (Fig. 95) drehbarer einarmiger Hebel BC. In dem Punkte D wirkt eine Kraft aufwärts, welcher durch das in B aufgehängte Gewicht das Gleichgewicht gehalten werden soll. In gleichem Sinne wie dieses wirkt aber das Gewicht des Hebels selbst. Es fragt sich, wie gross, mit Einrechnung dieses letzteren, das in B aufgehängte Gewicht sein muss, um einer bestimmten in D wirkenden Kraft das Gleichgewicht zu halten. Sei diese Kraft gleich 200[k] und die Entfernung des Punktes D von C gleich 6 Centimeter, so ist das statische Moment derselben durch die Zahl 1200

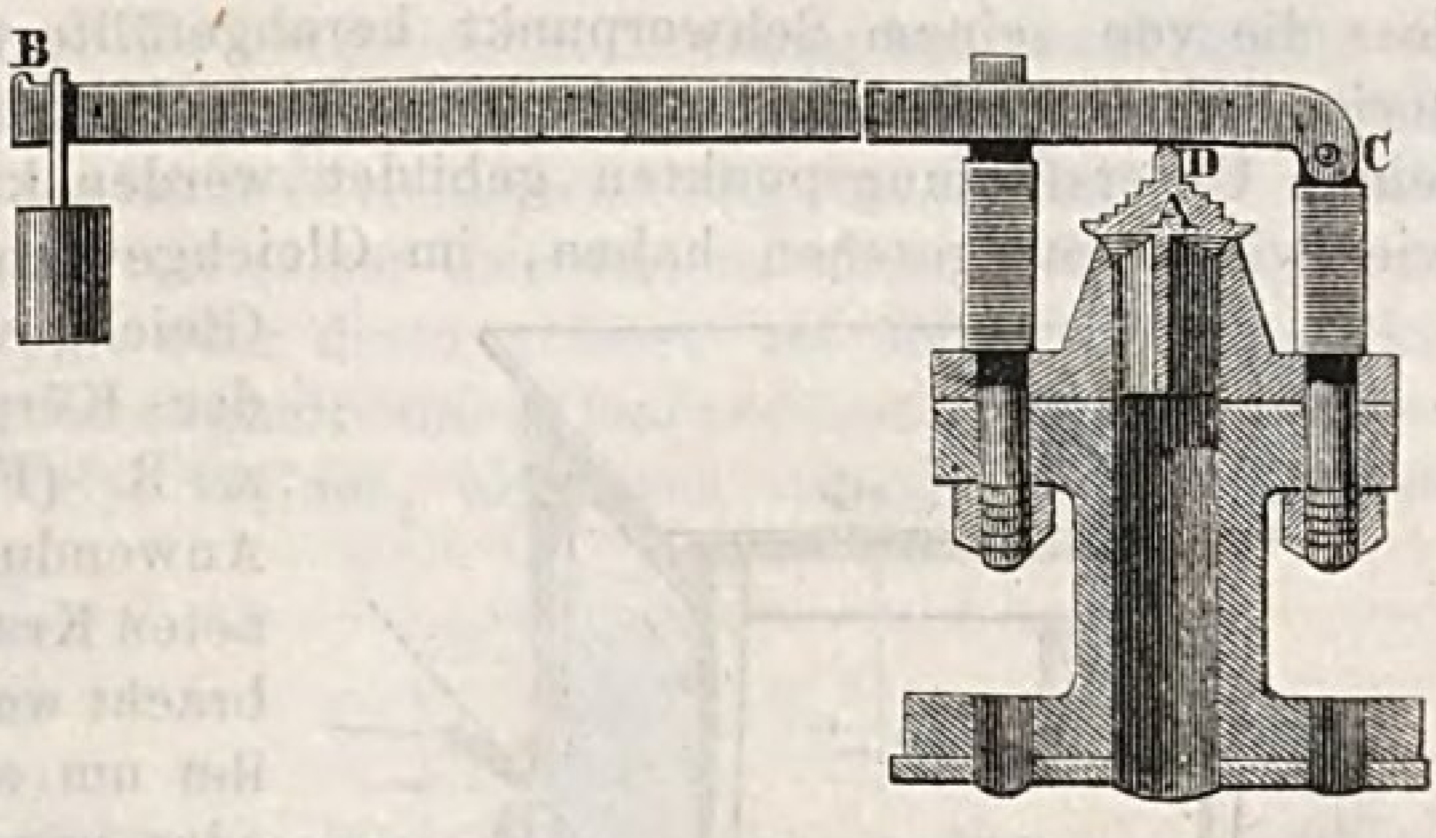


Fig. 95.

ausgedrückt. Diesem müssen die statischen Momente der beiden anderen Kräfte oder Gewichte zusammen gleich sein. Das Gewicht des Hebels sei 5^k und die Entfernung seines Schwerpunktes von C 24 Centimeter, das statische Moment des Hebelgewichtes also 120. Dann muss offenbar das statische Moment des in B aufgehängten Gewichtes noch 1080 betragen und dieses Gewicht selbst also bei einer Hebellänge BC = 50 Centimeter $21^3/_5{}^k$.

§. 70. Bei Allem, was wir bisher in Bezug auf den Hebel sagten, haben wir ihn als einen festen Körper von unveränderlicher Form betrachtet. Dies findet in Wirklichkeit nie statt; jede Kraft, wie klein sie auch sei, bringt eine Veränderung der Gestalt des Körpers hervor, auf welchen sie wirkt. Wenn ein Hebel dem Einfluss von Kräften unterworfen ist, so wird er sich anfangs biegen und alsdann die neue Gestalt, die er angenommen hat, so lange behalten, als diese Kräfte auf ihn wirken; er befindet sich dann also unter denselben Verhältnissen, als ob er niemals eine andere Form gehabt hätte als diejenige, welche ihm die Kräfte gegeben haben, und es kann also Alles, was oben für einen Hebel von unveränderlicher Form gesagt wurde, in aller Strenge auch auf ihn angewendet werden. Es ist klar, dass man überall, wo man einen Hebel anwendet, denselben hinreichend stark nehmen wird, damit die Veränderungen, welche seine Gestalt unter der Einwirkung der Kräfte erfährt, die Elasticitätsgrenze nicht überschreiten.

§. 71. **Standfestigkeit.** — Wenn ein Körper auf einer horizontalen Fläche aufruht, und es ist die Bedingung erfüllt, dass die von seinem Schwerpunkt herabgefällte Senkrechte die horizontale Ebene noch innerhalb des Vielecks trifft, welches aus seinen Unterstützungspunkten gebildet werden kann, so ist er, wie wir oben gesehen haben, im Gleichgewicht. Aus dieser Gleichgewichtslage kann der Körper, ein Tisch z. B. (Fig. 96) durch Anwendung einer geeigneten Kraft dadurch gebracht werden, dass man ihn um einen Eckpunkt oder, wie es häufiger vorkommt, um eine Seitenlinie AB des Vielecks, welches durch seine Unterstützungspunkte gebil-

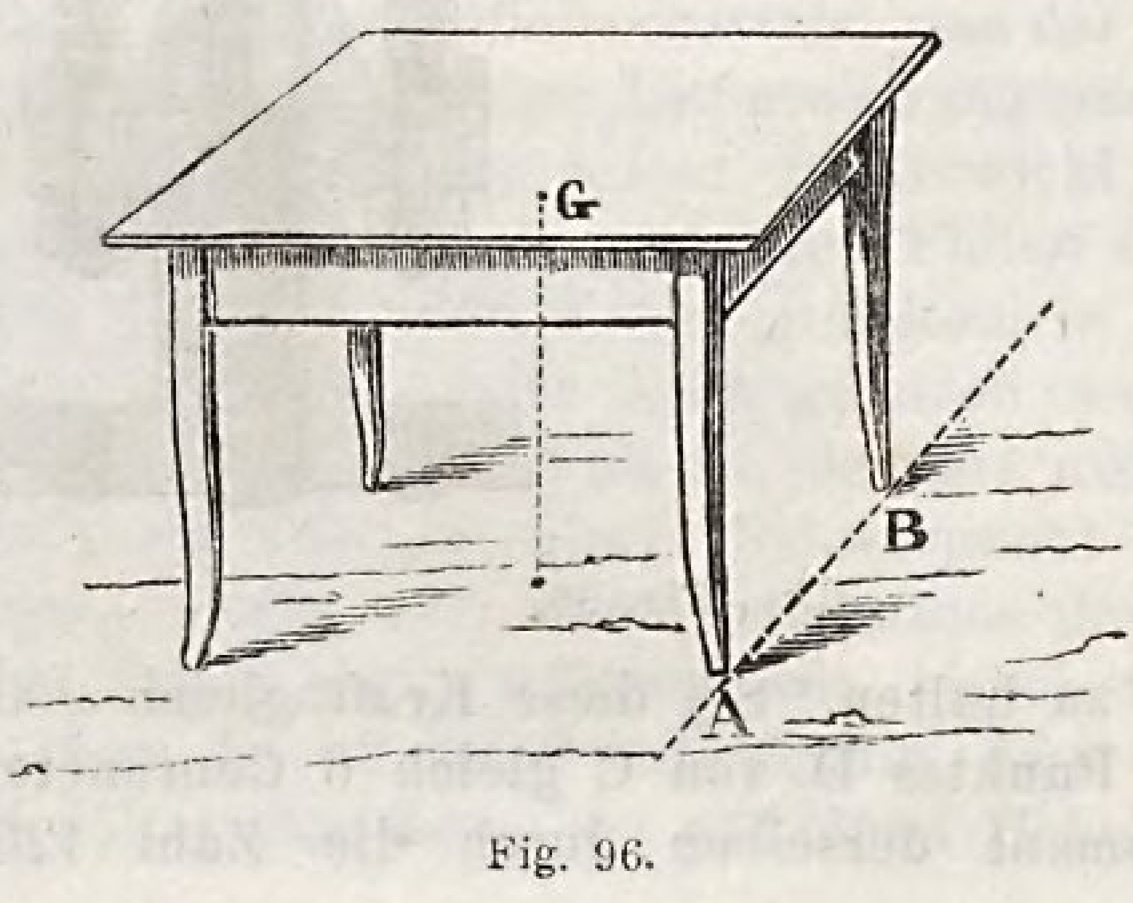


Fig. 96.

det wird, dreht oder umneigt. Bei dieser Drehung wird der Tisch eine Zeit lang in seine ursprüngliche Gleichgewichtslage zurückzufallen suchen, sowie die Kraft etwas nachlässt; diese Gleichgewichtslage war also eine haltbare oder stabile. Durch fortgesetzte Drehung gelangt man zu einer Lage des Tisches, wo er sich zwar für sich im Gleichgewicht halten kann, aber durch den geringsten Anstoss entweder in die vorige Lage zurück, oder auf die Seite umfällt. Dies ist offenbar dann der Fall, wenn der Schwerpunkt G senkrecht über der Kante AB (Fig. 97), um welche gedreht wird, liegt, und die dadurch bedingte Gleichgewichtslage ist eine unhaltbare oder labile. So lange der Körper bei der Drehung diese labile Gleichgewichtslage noch nicht erreicht hat, sucht er immer wieder in seine ursprüngliche Gleichgewichtslage zurückzukehren; sobald er sie aber überschreitet, fällt er um. Je grösser die Kraft ist, welche nothwendig ist, um bei einem auf einer horizontalen Ebene stehenden Körper die beschriebene Drehung hervorzubringen, und je grösser die Bewegung sein muss, um ihn aus seiner ursprünglichen Lage in die labile Gleichgewichtslage zu führen, bei welcher er eben beginnt, von selbst umzufallen: desto fester, sagt man, stehe der Körper, oder desto grösser sei seine Standfestigkeit. So ist die Standfestigkeit eines Quadersteines, wenn er aufrecht steht (Figur 98), kleiner, als wenn er auf seiner breitesten Seite liegt (Fig. 99), weil es im ersten Fall nur einer geringeren Kraft und einer geringeren Neigung bedarf, um ihn umzuwerfen.

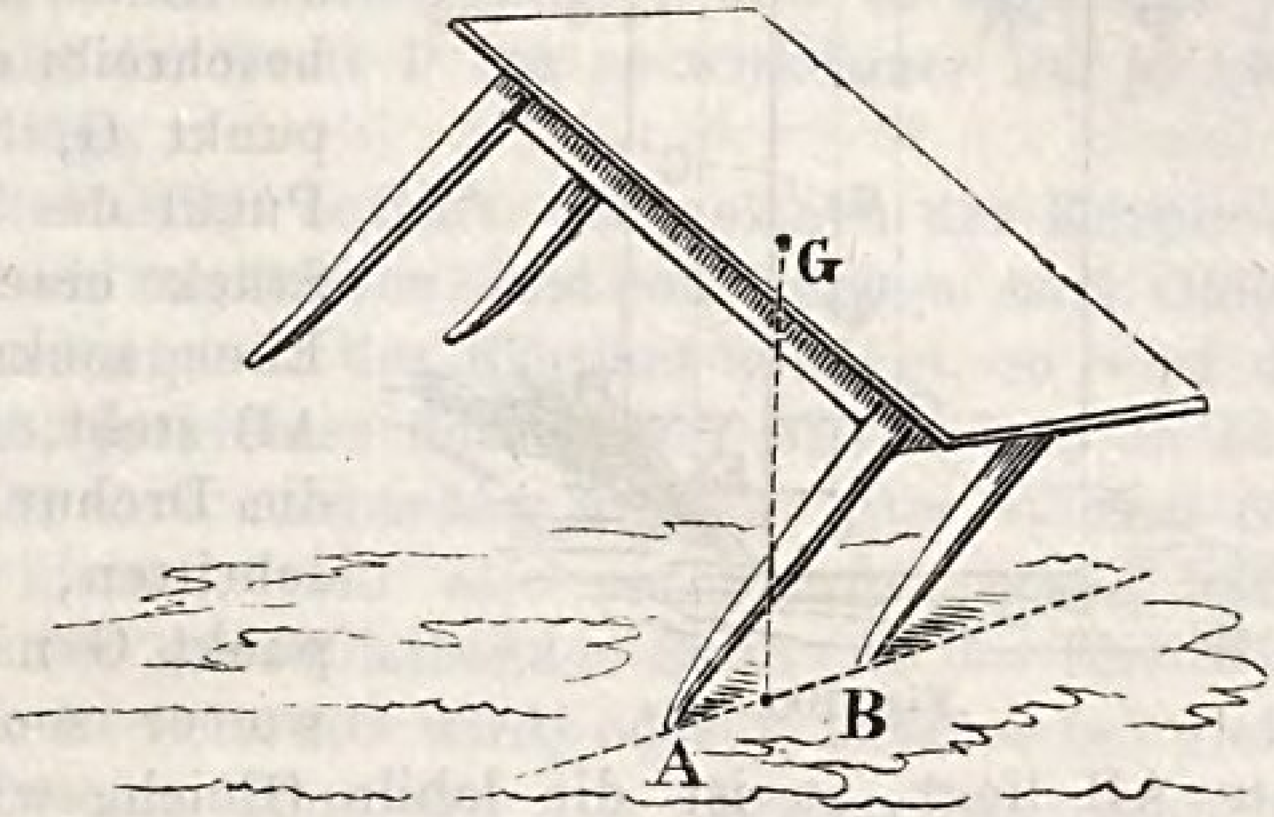
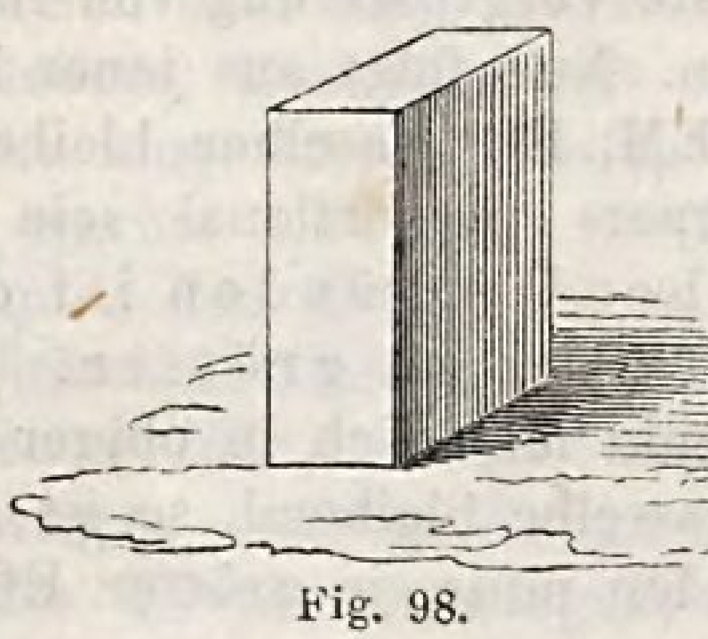
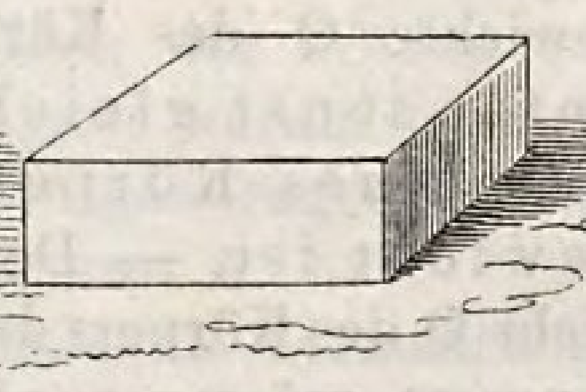


Fig. 97.


Fig. 98.


Fig. 99.

Um näher zu untersuchen, von welchen Umständen die Standfestigkeit eines Körpers abhängt, denken wir uns einen einfachen parallelepipedischen Körper (Fig. 100), der mit der Grundfläche ABCD auf einer horizontalen Fläche aufruht. Um denselben um die Kante AB z. B. umzuwerfen, werde eine horizontale Kraft P angewandt, die in dem Punkte M als Zug, oder was dieselbe Wirkung hervorbringen würde, in dem Punkte N als Druck wirkt.

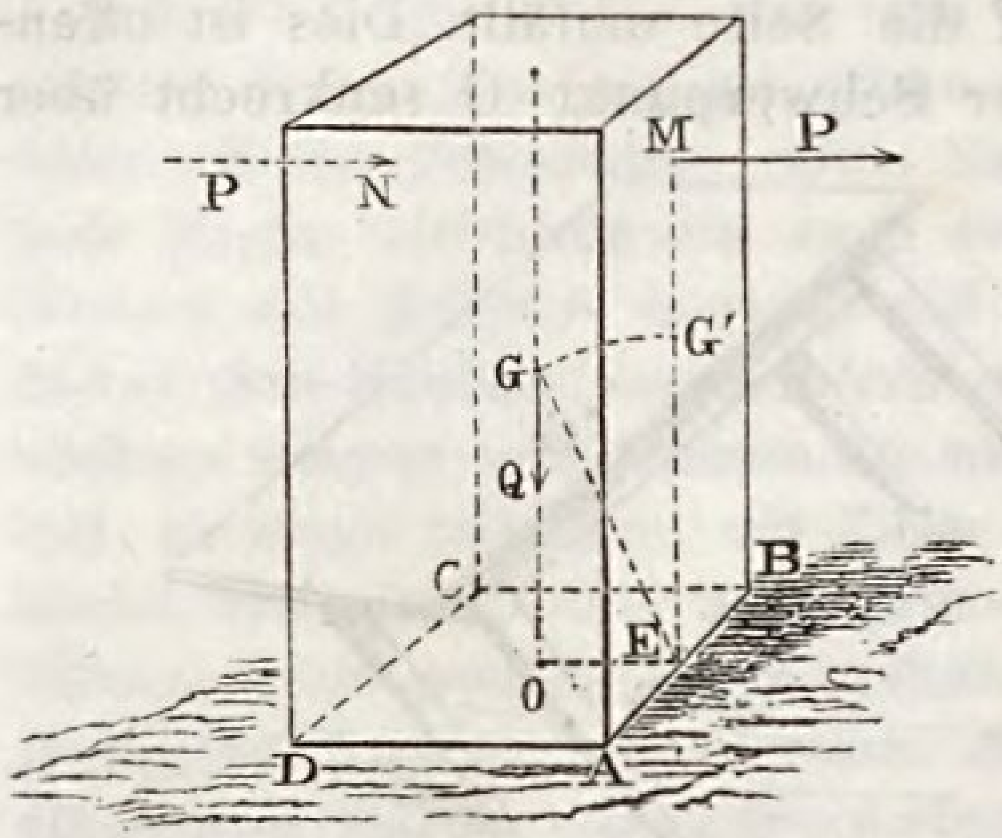


Fig. 100.

Wenn diese Kraft gross genug ist, so wird der Körper um die Kante AB gedreht, und es beschreibt dabei sein Schwerpunkt G, wie jeder andere Punkt des Körpers auch, ein Stück eines Kreises, dessen Ebene senkrecht auf der Kante AB steht. Ist auf diese Art die Drehung so weit fortgeschritten, dass der Schwerpunkt G nach G' gelangt ist, wo er senkrecht über der Kante AB liegt, so ist die labile Gleichgewichtslage erreicht, und bei der geringsten weiteren Drehung fällt der Körper von selbst um. Nach dem Obigen ist die Standfestigkeit des Körpers um so grösser, je grösser die aufzubietende Kraft P sein muss und je grösser der Winkel GEG' ist, um welchen der ganze Körper gedreht wurde. Auf den Körper wirkt ausser der Kraft P noch sein Gewicht, das wir uns als eine Kraft Q in seinem Schwerpunkt angebracht denken können. Diese beiden Kräfte können aber offenbar so betrachtet werden, als ob sie an dem Winkelhebel MEG wirkten, dessen Arme EM und EO sind. Sie sind daher im Gleichgewicht, wenn sich die Kraft P zur Kraft Q wie der Hebelarm EO zum Hebelarm EM verhält. Hat die Kraft P die durch diese Proportion vorgeschriebene Grösse, so verursacht die geringste Vergrösserung von ihr eine Drehung des Körpers in ihrem Sinn. Nun folgt aus jener Proportion, dass, so lange die Hebelarme EM, EO dieselben bleiben, die Kraft P dem Gewichte Q des Körpers proportional sein muss, das heisst: Unter sonst gleichen Umständen ist die Standfestigkeit eines Körpers um so grösser, je grösser sein Gewicht ist. — Denkt man sich in obiger Proportion das Gewicht Q des Körpers dasselbe bleibend, so ist klar, dass die Kraft P um so grösser werden muss, je grösser EO im Verhältniss zu

EM, je grösser also EO überhaupt, bei unverändertem EM, wird; das heisst aber: Unter sonst gleichen Umständen ist die Standfestigkeit eines Körpers um so grösser, je weiter der Punkt O, wo die vom Schwerpunkt herabgefällte Vertikale die Unterstützungsfläche trifft, von der Drehungskante AB entfernt ist. — Es folgt aus dem Obigen zwar auch, dass die Kraft P um so grösser werden muss, je kleiner EM bei unverändertem EO wird, je niedriger also der Angriffspunkt jener Kraft liegt. Dieser Angriffspunkt ist aber von dem Körper selbst unabhängig, und es sagt uns jene Bedingung blos, dass die Kraft P um so wirksamer ist, je höher ihr Angriffspunkt liegt.

Was den Winkel GEG' betrifft, um welchen der Körper gedreht werden muss, um umzufallen, und von welchem nach Obigem gleichfalls die Standfestigkeit des Körpers abhängt, so wird derselbe um so grösser, je kleiner der Winkel GEO wird, da beide zusammen immer 90 Gad ausmachen müssen. Der Winkel GEO wird aber um so kleiner, und also die Standfestigkeit um so grösser, je grösser bei gleichbleibender Seite OG des rechtwinkligen Dreiecks EOG die Seite EO wird, oder je kleiner bei gleichbleibender Seite EO die Seite OG ist. Ersteres bestätigt uns nochmals den eben ausgesprochenen Satz und letzteres sagt uns, dass unter sonst gleichen Umständen die Standfestigkeit eines Körpers um so grösser ist, je tiefer sein Schwerpunkt liegt.

Aus dem ersten der eben gefundenen drei Sätze erklärt sich's, warum ein Wagen leichter dem Umwerfen ausgesetzt ist, wenn er mit Heu, Wolle, Hohlglas und dergleichen leichten Materialien, als wenn er bis zur gleichen Höhe mit Steinen, Metallen oder derlei Körpern von grossem Gewicht beladen ist; warum Säulen, Postamente etc. von Holz leichter umgeworfen werden, als wenn sie, bei denselben Dimensionen, aus Stein oder Metall bestehen. — Aus dem zweiten Satz folgt, dass Säulen, Candelaber, Möbeln etc. mit breiten Grundflächen oder nach Aussen geschweiften Füssen, Mauern mit Strebepfeilern, Menschen mit auseinander gestellten Füssen weniger leicht umgeworfen werden. — Aus dem dritten Satz erklärt sich's, warum man beim Beladen der Wägen den schwersten Gegenständen den tiefsten Platz gibt, warum man die Füsse von Lampen, hohen Leuchtern und sonstigen Gegenständen, die leicht umgeworfen werden, mit Blei ausgiesst u. s. f.

§. 72. **Die Waage.** — Die Waage ist eine Vorrichtung, welche dazu dient, die Körper zu wiegen, d. h. die Anzahl der

Pfunde oder Kilogramme zu bestimmen, welche das Gewicht derselben ausdrücken. Man hat zu diesem Zweck sehr verschiedene Arten von Waagen erdacht, die jedoch fast alle auf Anwendung des Hebels oder einer Verbindung von Hebeln hinauslaufen. Die gebräuchlichste und, da sie zu genauen Gewichtsbestimmungen allein tauglich ist, zugleich wichtigste Waage ist die gewöhnliche oder gleicharmige, die im Wesentlichen aus einem Hebel, Waagbalken genannt, besteht, dessen Unterstützungspunkt in der Mitte seiner Länge gelegen ist, und welcher an beiden Enden zwei Waagschalen trägt. Im Uebrigen sind die Formen dieser Waage sehr verschieden, und indem wir die gebräuchlichsten derselben, in welchen sie die Namen gemeine Krämerwaage, Goldwaage etc. führt, als bekannt voraussetzen, beziehen wir unsere folgende Beschreibung und Untersuchung auf eine Waage, mit welcher feinere Wiegungen, wie sie namentlich zu wissenschaftlichen Zwecken erforderlich sind, vorgenommen werden können (Fig. 101). Damit der Waagbalken um seinen Unterstützungspunkt sehr leicht beweglich ist, und damit dieser Punkt während der Schwingungen des Waagbalkens um seine Gleichgewichtslage stets genau in der Mitte desselben bleibe, ist der

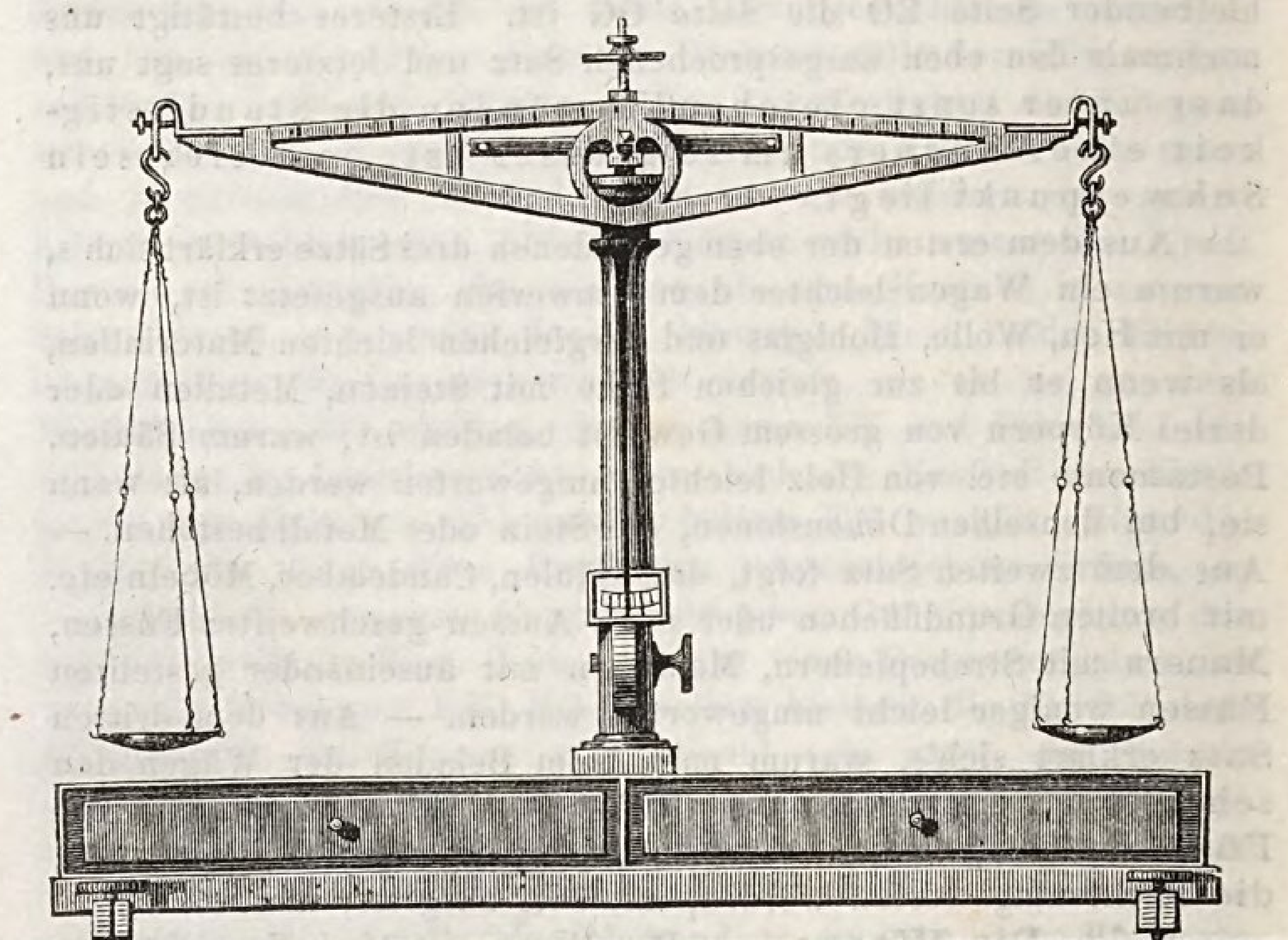


Fig. 101.

Waagbalken mit einem kleinen dreikantigen Prisma von Stahl versehen, welches quer durch seine Mitte hindurch gesteckt ist und auf beiden Seiten etwas hervorragt. Die nach unten gerichtete Kante dieses Prisma's bildet eine gute, aber nicht eigentlich scharfe Schneide, in welcher sich der ganze Waagbalken auf zwei kleine ebene Unterlagen von Stahl oder Achat stützt, welche, die eine vor, die andere hinter dem Waagbalken, horizontal auf einer feststehenden Säule befestigt sind. Diese Schneide bildet die Drehungsachse des Waagbalkens, um welche er seine Schwingungen ausführt.

Zwei ähnliche Schneiden befinden sich an den beiden Enden des Waagbalkens, nur sind sie hier nach oben gerichtet; auf diese beiden Schneiden stützen sich die Haken, an welche die Ketten oder Schnüre befestigt sind, welche die Waagschalen tragen.

Damit die Schneide in der Mitte, deren Feinheit für die leichte Beweglichkeit des Waagbalkens besonders erforderlich ist, möglichst geschont werde, kann sie nach jedesmaligem Gebrauch der Waage von ihrer Unterlage abgehoben werden. Zu diesem Zweck ist in der hohlen Säule, auf welcher die ganze Waage ruht, ein Stab verschiebbar, der sich oben in zwei horizontale Arme endigt. Wenn dieser Stab durch Drehung eines unten angebrachten Griffes aufwärts geschoben wird, so ergreifen zwei an jenen Armen befestigte Stifte den Waagbalken zu beiden Seiten seiner Drehungsachse und heben ihn in die Höhe. Man sieht, dass diese Vorrichtung zugleich zum Beruhigen der Waage dienen kann, wenn sie zu grosse Schwingungen macht.

Um einen Körper mittelst der Waage zu wiegen, legt man denselben in die eine Waagschale und in die andere so viel bekannte Gewichte, bis das Gleichgewicht hergestellt ist, d. h. der Waagbalken in horizontaler Lage verharrt, was man dadurch erkennt, dass ein an demselben angebrachter Zeiger (Zunge), der in unserer Figur nach unten gerichtet ist, an einem gewissen, bezeichneten Punkt einspielt. Vorausgesetzt dann, dass die Waage richtig ist, darf man nur die Anzahl der Kilogramme, Gramme etc. zählen, welche die angewandten Gewichte enthalten, um das Gewicht des Körpers zu bekommen. Damit aber eine Waage richtig sei, muss sie vornehmlich zwei Bedingungen erfüllen: 1) die Entfernungen des Unterstützungspunktes des Waagbalkens von den Aufhängepunkten der Waagschalen, d. h. die Waagbalkenarme müssen gleich sein; 2) wenn kein Körper in den Waagschalen liegt, muss der Waagbalken horizontal stehen. In der That, wenn diese beiden Bedingungen erfüllt sind und der Waag-

balken bleibt horizontal, nachdem man zwei Körper in seine beiden Waagschalen gelegt hat, so sieht man leicht, dass die Gewichte dieser beiden Körper nothwendig gleich sein müssen; denn diese Gewichte sind zwei Kräfte, welche sich das Gleichgewicht halten, indem sie auf den Waagbalken an den Enden zweier gleichgrosser Hebelarme wirken.

Um die Richtigkeit einer Waage zu prüfen, begnügt man sich gewöhnlich damit, sich zu überzeugen, dass die zweite der obigen Bedingungen erfüllt ist; aber dies reicht allein nicht aus. Die Waage kann, obwohl jene Bedingung zutrifft, noch sehr unrichtig sein, weil dieselbe, wie man leicht sieht, die Gleichheit der Hebelarme des Waagbalkens noch keineswegs erfordert. Um sich von der Richtigkeit einer Waage zu überzeugen, muss man auf folgende Art verfahren. Nachdem man sich versichert hat, dass der Waagbalken im Gleichgewicht ist, wenn beide Waagschalen leer sind, legt man in jede derselben Gewichte, die so gewählt sind, dass der Waagbalken horizontal bleibt; alsdann verwechselt man diese Gewichte, indem man in die linke Waagschale diejenigen legt, die vorhin in der rechten waren, und umgekehrt; wenn dann der Waagbalken noch horizontal bleibt, so kann man sicher sein, dass die Waage richtig ist. Denn wenn die Hebelarme des Waagbalkens ungleich wären, so müssten die Gewichte, welche man in die Schalen gelegt hat, und welche an den Enden jener Hebelarme angreifen, ebenfalls ungleich sein; das grössere derselben würde an dem kleineren, das kleinere an dem grösseren Hebelarm wirken. Durch Verwechseln dieser Gewichte würde also das grössere an dem grösseren und das kleinere an dem kleineren Hebelarm angebracht werden; sie könnten sich also in ihrer neuen Lage nicht mehr das Gleichgewicht halten, und der Waagbalken würde nicht horizontal bleiben.

§. 73. **Empfindlichkeit einer Waage.** — Damit mittelst einer Waage das Gewicht eines Körpers sehr genau bestimmt werden kann, reicht es nicht blos hin, dass sie richtig ist, sie muss auch sehr empfindlich sein; d. h. wenn der Waagbalken unter dem Einfluss zweier gleicher, in beiden Schalen liegender Gewichte horizontal steht, und es wird auf der einen Waagschale ein auch nur sehr kleines Gewichtchen, ein Milligramm z. B., zugefügt, so muss er sich aus dieser Gleichgewichtslage sofort herausbewegen und eine von derselben merklich verschiedene, neue Gleichgewichtslage einnehmen. Nun drängt sich als erste Bedingung für die Empfindlichkeit einer Waage offenbar die auf, dass sich der Waagbalken mit grosser Leichtigkeit

um seine Achse drehen lasse. Diese erhält daher, wie bereits oben beschrieben worden ist, die Form einer Schneide, welche auf ebenen Unterlagen von Stahl oder Achat ruht. Aus gleichem Grunde werden die Aufhängepunkte der Waagschalen von nach aufwärts gerichteten Schneiden gebildet. — Es gibt aber noch andere Bedingungen für die Empfindlichkeit einer Waage, die sich am besten durch eine nähere Betrachtung der Wirksamkeit der Kräfte an einem bereits mit gleichen Gewichten belasteten Waagbalken ergeben, der durch ein kleines Uebergewicht auf der einen Seite aus seiner Gleichgewichtslage gebracht wird. Die Fig. 102 stelle den Waagbalken in einfachster Gestalt in horizontaler Lage vor. A und B seien die Aufhängepunkte der Waagschalen und C der Unterstützungspunkt des Waagbalkens, der hier um die Entfernung CH senkrecht über der Mitte H der Verbindungslinie AB angenommen worden ist.

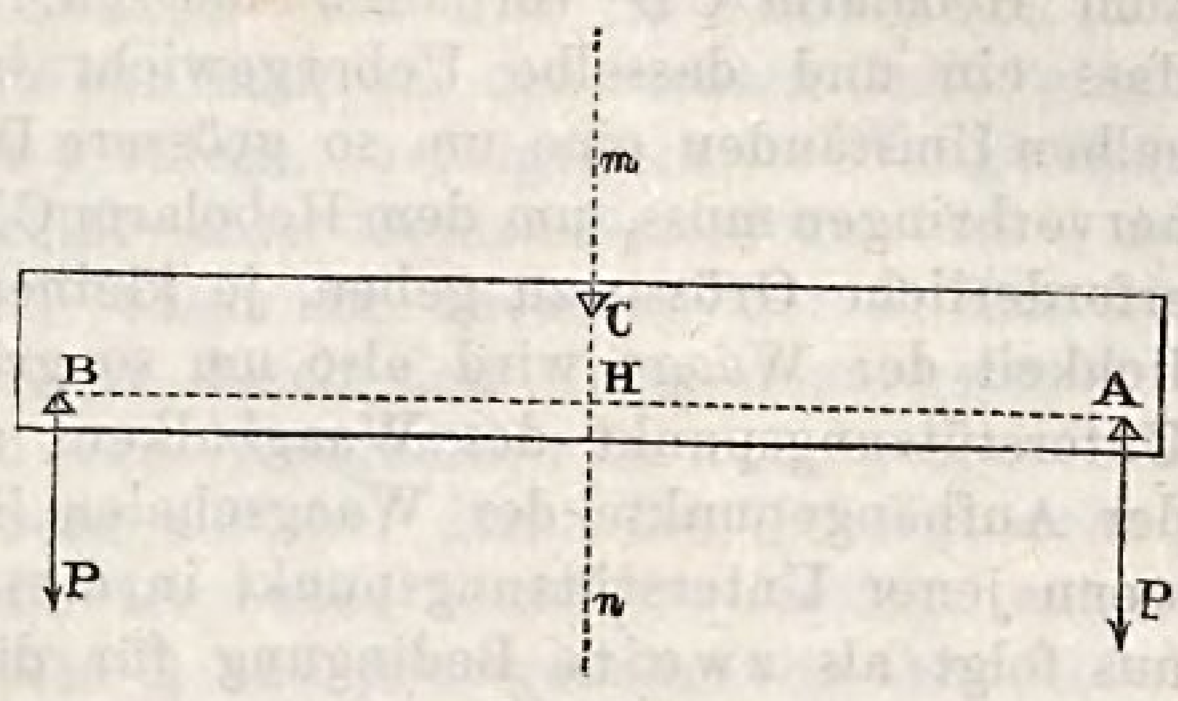


Fig. 102.

Die Gewichte der in den Punkten A und B hängenden Waagschalen nebst den in ihnen liegenden Körpern kann man sich als zwei gleiche Kräfte P in jenen Punkten wirkend denken. Vernachlässigen wir zunächst das Gewicht des Waagbalkens, so sind diese beiden Kräfte die einzigen, welche an dem Waagbalken wirken; ihre Mittelkraft, gleich ihrer Summe, hat die Richtung der Vertikalen mn, welche durch den Punkt H gelegt ist, und da diese Vertikale in der horizontalen Lage des Waagbalkens durch den Unterstützungspunkt C geht, so ist klar, dass der Waagbalken in dieser Lage im Gleichgewicht ist. Nun werde auf der rechten Seite ein Uebergewicht p beigelegt, so wird sich der Waagbalken neigen und eine neue Gleichgewichtslage (Fig. 103) einnehmen müssen. In dieser geht die Mittelkraft der

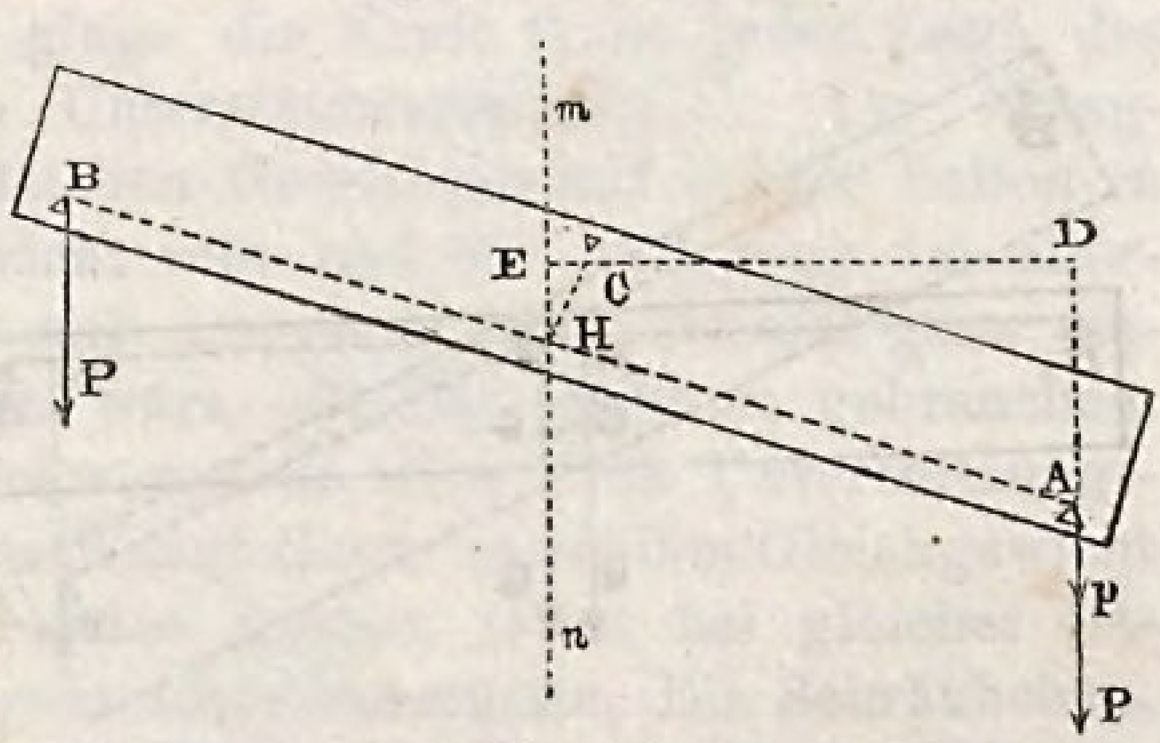


Fig. 103.

beiden gleichen Kräfte P, welche in A und B wirken, immer noch durch den Halbirungspunkt H von AB, aber, wie man sieht, nicht mehr durch den Unterstützungspunkt C; sie sucht also den Waagbalken wieder in entgegengesetzter Richtung zu drehen, woran sie jedoch durch das Uebergewicht *p* gehindert wird. Es ist klar, dass diese beiden Kräfte so zu betrachten sind, als wenn sie an einem Winkelhebel wirkten, dessen Arme CD und CE sind. Im Falle ihres Gleichgewichts wird sich also das Uebergewicht *p* zu der in der Richtung der Vertikalen *mn* wirkenden Mittelkraft der beiden Kräfte P wie der Hebelarm CE zum Hebelarm CD verhalten müssen. Nun sieht man leicht, dass ein und dasselbe Uebergewicht im Punkte A unter denselben Umständen eine um so grössere Drehung des Waagbalkens hervorbringen muss, um dem Hebelarm CE die zum Gleichgewicht erforderliche Grösse zu geben, je kleiner CH ist. Die Empfindlichkeit der Waage wird also um so grösser sein, je näher der Unterstützungspunkt des Waagbalkens an der Verbindungslinie der Aufhängepunkte der Waagschalen liegt, am grössten dann, wenn jener Unterstützungspunkt in diese Linie selbst fällt. Daraus folgt als zweite Bedingung für die Empfindlichkeit einer Waage, dass der Unterstützungspunkt des Waagbalkens und die Aufhängepunkte der Waagschalen in gerader Linie liegen sollen. Wenn diese Bedingung erfüllt ist, geht die Mittelkraft der beiden gleichen Gewichte P in den Punkten A und B in jeder Lage des Waagbalkens durch dessen Unterstützungspunkt. Dieser wäre daher unter dem alleinigen Einfluss jener beiden gleichen Kräfte in jeder Lage im Gleichgewicht, und das kleinste Uebergewicht auf der einen Seite würde ihn sofort ganz umfallen machen; die Waage würde also ganz unbrauchbar sein, wenn nicht noch das Gewicht des Waagbalkens in's Spiel käme, das wir bisher ganz vernachlässigt haben.

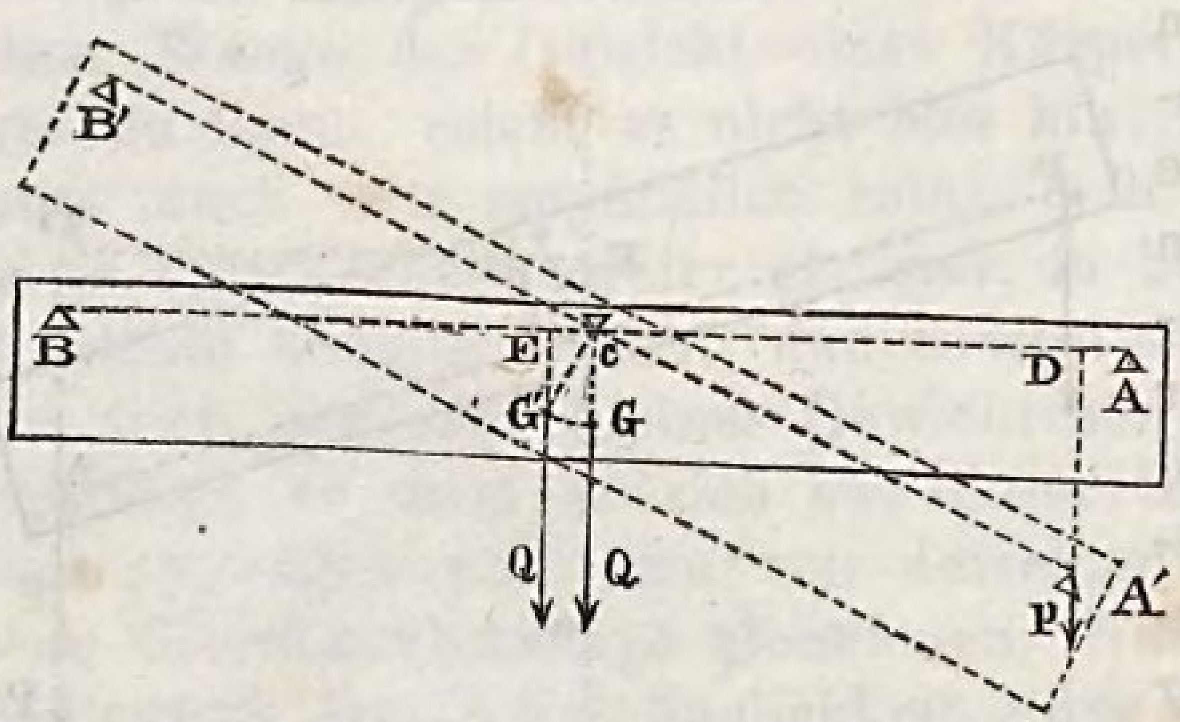


Fig. 104.

Die Fig. 104 stelle wieder den Waagbalken in horizontaler Lage vor; der Unterstützungspunkt C desselben sei mit den Aufhängepunkten A und B der Waagschalen in gerader Linie und in der Mitte zwischen

ihnen gelegen. Der Punkt G sei der Schwerpunkt des Waagbalkens, vertikal unter dem Unterstützungspunkt desselben liegend; in ihm müssen wir uns eine Kraft Q gleich dem Gewicht des Waagbalkens angebracht denken. Ausserdem wirken an den Punkten A und B die zwei gleichen Kräfte P, die Gewichte der Waagschalen nebst der in ihnen liegenden Körper. Da aber die Mittelkraft dieser Kräfte in jeder Lage des Waagbalkens durch den Unterstützungspunkt C geht, so haben dieselben keinen Einfluss auf die Drehung des Waagbalkens, die Empfindlichkeit der Waage ist daher unabhängig von den Gewichten der Waagschalen und der in denselben liegenden Belastung. Wenn man auf der rechten Seite wieder ein kleines Uebergewicht p zulegt, so neigt sich der Waagbalken; der Schwerpunkt beschreibt einen kleinen Kreisbogen um C und gelangt von G nach G', sodass die Richtung der in ihm wirkenden Kraft Q nicht mehr durch den Unterstützungspunkt C geht. Diese sucht also den Waagbalken in entgegengesetzter Richtung zu drehen, woran sie aber durch das Uebergewicht p gehindert wird. Im Falle der neuen Gleichgewichtslage müssen sich aber die beiden Kräfte Q und p umgekehrt wie ihre Hebelarme CE und CD verhalten, woraus, wie leicht zu sehen, Folgendes hervorgeht: Um durch die Drehung des Waagbalkens in Folge der Zulage eines gewissen Uebergewichts bei A dem Hebelarm CE die erforderliche Länge zu geben, muss diese Drehung um so grösser sein: 1) je kleiner CG, 2) je kleiner das Gewicht Q des Waagbalkens und 3) je länger der Hebelarm CD ist.

Aus dem ersten dieser drei Punkte folgt, als dritte Bedingung für die Empfindlichkeit der Waage, dass der Schwerpunkt des Waagbalkens möglichst nahe unter dem Unterstützungspunkt desselben gelegen sein soll. In den Unterstützungspunkt selbst darf jedoch der Schwerpunkt nicht fallen; denn dann ginge die Kraft Q in jeder Lage des Waagbalkens durch den Unterstützungspunkt C. Der Waagbalken würde also bei gleichen Gewichten auf beiden Seiten in jeder Lage im Gleichgewicht sein und bei Auflegung des allergeringsten Uebergewichts auf der einen Seite allemal ganz umfallen; eine solche Waage wäre offenbar nicht zu gebrauchen. Ebensowenig darf der Schwerpunkt über dem Unterstützungspunkt liegen, da sonst der Waagbalken im labilen Gleichgewicht wäre und bei jedem kleinsten Anstoss selbst bei gleicher Belastung auf beiden Seiten ganz umfallen müsste. Ein Schräubchen, das man in Fig. 101 über der Mitte des Waagbalkens sieht, ge-

stattet durch sein Hinauf- oder Herabschrauben den Schwerpunkt näher an den Unterstützungspunkt zu rücken oder weiter davon zu entfernen, also die Waage empfindlicher oder weniger empfindlich zu machen. Eine sehr empfindliche Waage schwingt nämlich sehr langsam, sodass zum sehr genauen Wiegen eines Körpers viel Zeit erforderlich ist. Wenn man daher keine sehr grosse Genauigkeit erzielen will, so wird man es vorziehen, um Zeit zu ersparen, die Waage weniger empfindlich zu machen.

Aus dem zweiten der obigen drei Punkte folgt als vierte Bedingung der Empfindlichkeit, dass der Waagbalken möglichst leicht sein soll. Da aber derselbe auch noch genug Festigkeit besitzen muss, um einer Biegung durch die Gewichte auf seinen Waagschalen zu widerstehen, so wird er gewöhnlich durchbrochen und erhält die aus Fig. 101 ersichtliche Gestalt, welche möglichste Leichtigkeit mit möglichster Unbiegsamkeit verbindet. — Aus dem letzten der obigen drei Punkte folgt endlich als fünfte Bedingung der Empfindlichkeit, dass der Waagbalken möglichst lang sein soll. Dass man darin jedoch, abgesehen von der Unbequemlichkeit eines übermässig langen Waagbalkens, nicht zu weit gehen darf, geht schon daraus hervor, dass mit der Länge des Waagbalkens zugleich sein Gewicht und seine Biegsamkeit vergrössert wird.

Wenn oben gesagt wurde, dass die Empfindlichkeit der Waage von ihrer Belastung unabhängig sei, so ist dies nur innerhalb gewisser Grenzen richtig. Bei sehr grosser Belastung leidet die Empfindlichkeit einer Waage: einestheils weil dadurch der Waagbalken gebogen wird, und also die Punkte A, B, C nicht mehr in gerader Linie liegen; anderntheils weil die Schneiden durch sehr grosse Drückungen, welche sie auszuhalten haben, in ihrer Gestalt etwas verändert werden, wodurch die Beweglichkeit des Waagbalkens sehr verringert wird.

Durch Erfüllung aller oben angegebenen Bedingungen erhält man Waagen, mit denen Körper, deren Gewichte in ziemlich weiten Grenzen liegen, noch mit grosser Genauigkeit gewogen werden können. Gewöhnlich gibt man für den Grad der Empfindlichkeit einer Waage den, noch einen merklichen Ausschlag bewirkenden Bruchtheil der grössten Last an, welche sie, ohne Schaden zu leiden, in jeder Schale zu tragen vermag, und welche die Tragkraft der Waage heisst. Eine gute Waage soll eine Empfindlichkeit von mindestens $^1/_{60000}$ besitzen, d. h. schon bei $^1/_{60000}$ ihrer Tragkraft merklich ausschlagen. Bei Waagen von ausgezeichneter Güte, wie sie von *Oertling* in Berlin und *Kraft* in

Wien gefertigt werden, beträgt die Empfindlichkeit $^1/_{1000000}$, und *Deleuil* in Paris hat eine Waage construirt, die bei 10 Kilogramm Belastung auf jeder Schale noch ein Milligramm zieht.

Wenn eine Waage sehr empfindlich ist, so bringt sie ein sehr kleines Gewicht aus ihrer Gleichgewichtslage; aber in ihrer neuen Stellung kommt sie nicht eher zur Ruhe, als bis sie zu beiden Seiten derselben eine Reihe von immer kleiner werdenden Schwingungen ausgeführt hat. Damit man nun nicht genöthigt ist, zu warten, bis die Schwingungen vollständig beendigt sind, was lange dauern kann, so bewegt sich die Spitze des Zeigers, welcher an dem Waagbalken befestigt ist und mit diesem zugleich schwingt, längs eines getheilten Kreisbogens. Wenn man sieht, dass sich der Zeiger bei seinen Schwingungen rechts und links gleich weit von dem Theilungspunkt des Kreisbogens entfernt, welcher der horizontalen Lage des Waagbalkens entspricht, so kann man sicher sein, dass die in die Schalen gelegten Gewichte gleich sind; es ist nicht nöthig, zu warten, bis der Waagbalken zur Ruhe gekommen ist, um zu erkennen, dass er horizontal stehen bleiben wird.

§. 74. Wo es auf grosse Genauigkeit im Wiegen ankommt, ist die Empfindlichkeit einer Waage von grösserer Bedeutung, als ihre Richtigkeit. Denn mit einer Waage, welche bei bestimmter Belastung 1 Milligramm z. B. nicht mehr zieht, kann man eben das Gewicht eines Körpers niemals bis auf 1 Milligramm genau bestimmen. Dagegen kann auch mit einer ganz unrichtigen Waage mittelst einer von *Borda* angegebenen Methode, die unter dem Namen der Methode der doppelten Wiegung bekannt ist, das Gewicht eines Körpers ganz richtig gefunden werden. Diese Methode besteht in folgendem Verfahren:

Nachdem man den zu wiegenden Körper in die eine Waagschale gelegt hat, bringt man in die andere so viele Schrotkörner oder Sand, bis die Waage in's Gleichgewicht gebracht ist. Alsdann nimmt man den Körper aus seiner Waagschale heraus und bringt an seine Stelle so viele bekannte Gewichte, als nöthig sind, dass der Waagbalken wieder horizontal steht oder solche Schwingungen macht, dass er sich von der horizontalen Lage zu beiden Seiten gleich weit entfernt. Es ist klar, dass diese zuletzt eingelegten Gewichte unter denselben Umständen ganz dieselbe Wirkung wie der Körper hervorbringen; sie müssen also das Gewicht desselben ausdrücken.

§. 75. **Die Brückenwaage.** — Die Brückenwaage, nach ihrem Erfinder auch Quintenz'sche Waage genannt, wird

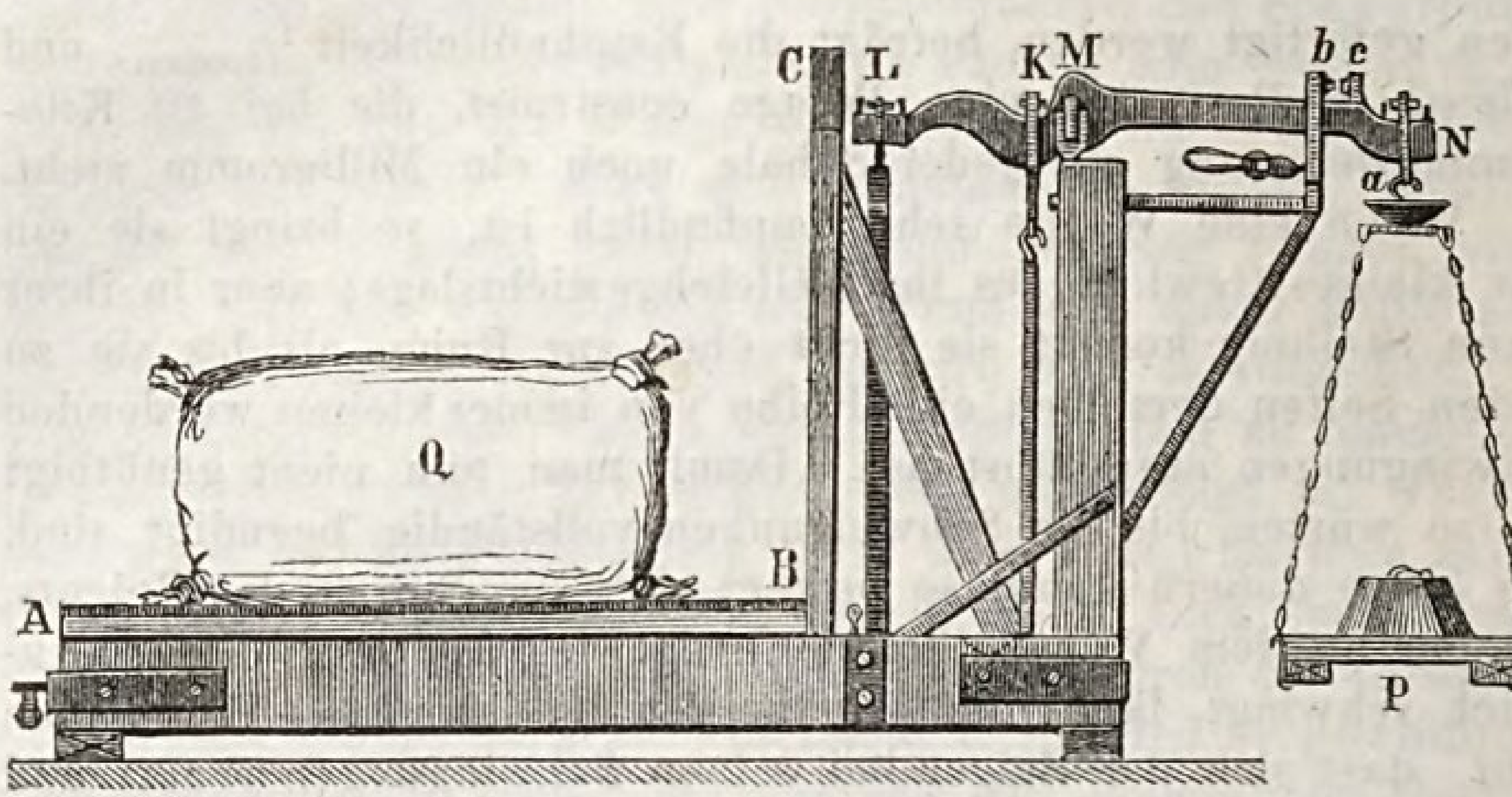


Fig. 105 .

namentlich im Handel zum Wiegen schwererer Körper, als Ballen, Fässer etc., sowie auch in Eisenbahn- und Postbureaux zum Wiegen des Reisegepäcks angewendet und hat wegen ihrer grossen Bequemlichkeit eine weite Verbreitung gefunden. Sie ist in Fig. 105 abgebildet. Die Fig. 106 soll ihren Mechanismus deutlicher zeigen. Der zu wiegende Körper wird auf die Platte AB, Brücke genannt, gelegt, an deren einem Rande ein aufwärts gerichtetes Schutzbrett BC befestigt ist, von dem wieder eine Stütze bis zum Querbalken D hinabgeht. Die Brücke stützt sich einerseits in E auf den Hebel FG, andererseits ist sie bei H in einen Ring eingehängt, in welchen sich die Stange HK endigt. Der Hebel FG, welcher um den Punkt F beweglich ist, stützt sich bei G gegen das untere Ende der Stange GL. Die zwei Stangen HK und GL sind ihrerseits wieder in ihren oberen Endpunkten K und L an dem Hebel LN aufgehängt, welcher um den Punkt M drehbar ist; dieser Hebel trägt in N eine Waagschale P, die zur Aufnahme der Gewichte dient. Die Entfernungen der erwähnten Stütz- und Drehungspunkte sind so gewählt, dass das Verhältniss von EF zu

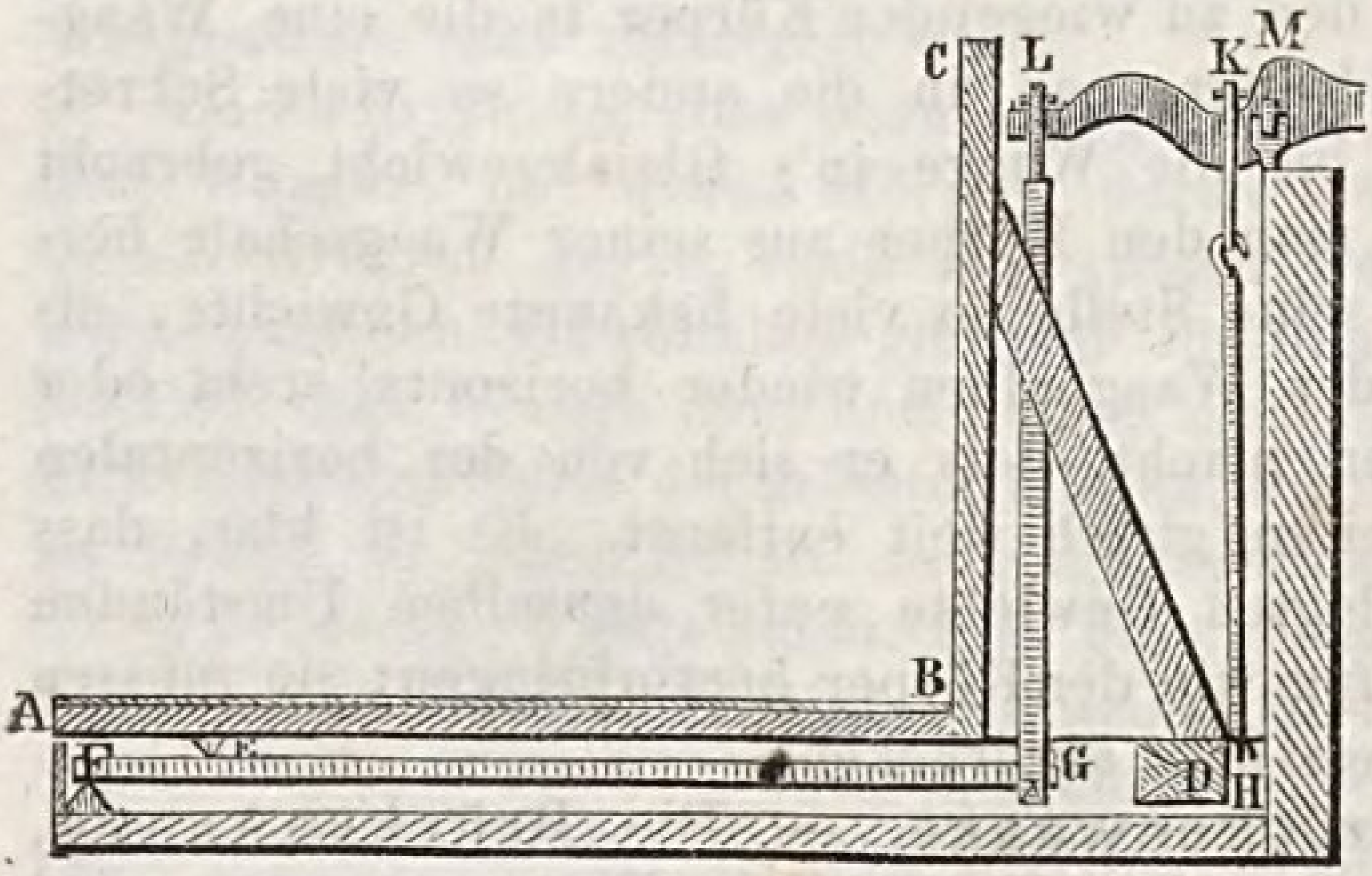


Fig. 106.

GF dasselbe ist, wie das Verhältniss von KM zu LM; wenn also z. B. EF der fünfte Theil von GF ist, so muss auch KM der fünfte Theil von LM sein. Ausserdem ist gewöhnlich KM der zehnte Theil von MN.

Nehmen wir an, dass, wenn auf der Brücke AB kein Körper gelegen ist, der Hebel LN unter der Einwirkung seines eigenen Gewichts, des Gewichts der Waagschale P und der Drückungen, welche in K und L durch die dort aufgehängten Stäbe ausgeübt werden und welche von den Gewichten der verschiedenen Theile der Waage herrühren, im Gleichgewicht sei. Wenn dann auf die Brücke AB ein Körper Q gelegt wird, so vertheilt sich sein Gewicht auf die Punkte E und H der Brücke, und zwar in ganz zufälliger Weise, die von der Stellung des Körpers auf der Brücke abhängt. Derjenige Theil dieses Gewichtes, welcher in H angreift, bringt in dem Punkt K des Hebels LN einen Druck gleich seiner eigenen Grösse hervor. Der andere Theil dieses Gewichtes, der in dem Punkt E des Hebels FG wirkt, übt durch Vermittlung dieses Hebels auf das untere Ende G der Stange GL einen Druck aus, der in Folge des oben angenommenen Verhältnisses, fünfmal so klein ist. Dieser Druck, der sich ohne Veränderung seiner Grösse bis an den Punkt L des Hebels LN fortpflanzt, bringt an diesem Hebel dieselbe Wirkung hervor, wie ein fünfmal so grosser Druck in dem Punkt K; es ist also gerade so, als ob der zweite Theil des Gewichtes Q direct an dem Punkte K angreifen würde. Man sieht daraus, dass sich in Folge der Gleichheit der Verhältnisse EF zu GF und KM zu LM der Hebel LN ganz unter denselben Umständen befindet, als ob das ganze Gewicht des Körpers Q in dem Punkte K aufgehängt wäre; um ihn also in's Gleichgewicht zu bringen, müssen in die Waagschale P so viele Gewichte gelegt werden, als der zehnte Theil des Gewichtes des Körpers Q beträgt.

Bevor man sich der Brückenwaage zum Wiegen eines Körpers bedient, muss man sich versichern, dass der Hebel LN horizontal steht, wenn die Brücke AB noch leer ist. Gewöhnlich ist dies nicht der Fall, und man ist desshalb genöthigt, gewisse kleine Gewichte in die Waagschale P zu legen. Diese Gewichte nennt man Tarirgewichte; um sie nicht mit den Gewichten zu verwechseln, die man später, behufs des Wiegens eines Körpers, in dieselbe Waagschale bringen muss, legt man sie gewöhnlich in ein kleines Schälchen a, das über den Ketten angebracht ist, welche die Wagschale P tragen. Die horizontale Lage des Hebels LN erkennt man mit Hilfe zweier vorstehender Zeiger *b*, *c*, von

denen der eine, welcher mit dem Hebel beweglich ist, sich dem andern, feststehenden, gegenüberstellen muss. Wenn man alsdann einen Körper auf die Brücke AB gelegt und mit Hilfe von bekannten in die Waagschale P gelegten Gewichten das Gleichgewicht hergestellt hat, so darf man nur die Anzahl der Gramme oder Kilogramme, welche jene Gewichte repräsentiren, zehnmal nehmen, um das Gewicht des Körpers zu erhalten. Dieses letzteren Umstandes wegen heisst die Waage auch eine Decimalwaage; die bei ihr verwendeten Gewichte sind gewöhnlich, um obige Multiplication mit zehn zu ersparen, mit Werthen bezeichnet, die das zehnfache ihres eigentlichen Gewichts betragen.

§. 76. **Die Schnellwaage.** — Die Schnellwaage besteht aus einem Hebel AB (Fig. 107), der in dem Punkte C aufgehängt und um diesen Punkt beweglich ist. In dem Punkt A ist ein Haken oder manchmal auch eine Waagschale angebracht. Ein Bügel D, welcher längs BC verschoben werden kann, trägt ein Gewicht Q. Wenn der zu wiegende Körper P an dem Haken aufgehängt ist, so verschiebt man den Bügel D so lange, bis der Hebel AB horizontal bleibt. Die Stellung des Bügels hängt offenbar von dem Gewichte des Körpers ab und kann daher zur Bestimmung desselben dienen. Zu diesem Ende darf man nur vorher den Arm BC des Hebels in geeigneter Weise eintheilen, d. h. diejenigen Punkte auf demselben bezeichnen, an welche der Bügel zu stehen kommt, wenn der an dem Haken aufgehängte Körper 1^k, 2^k, 3^k etc. wiegt. Man sieht, dass die

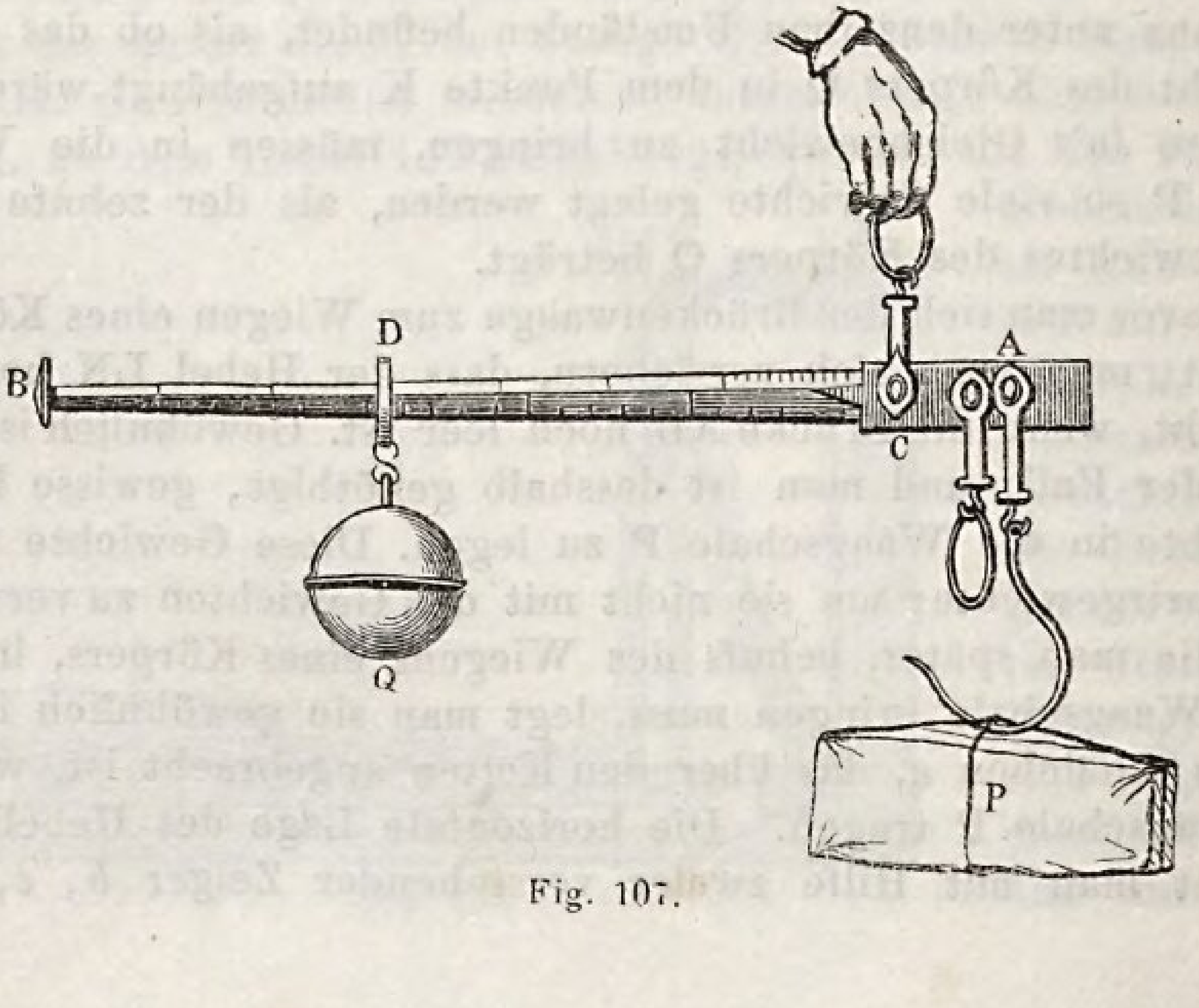


Fig. 107.

Operation des Wiegens mit dieser Waage schnell und bequem auszuführen ist, dass sie also ihren Namen mit Recht trägt, wenn sie auch auf grosse Genauigkeit keinen Anspruch machen kann.

Die Schnellwaage ist, wie Fig. 107 zeigt, häufig mit zwei Ringen versehen, an denen sie aufgehängt werden kann; alsdann muss der Haken, an welchen der zu wiegende Körper gehängt wird, um das äusserste Ende des Hebels herumgedreht werden können, so dass er stets nach unten gerichtet ist, an welchem der beiden Ringe die Waage auch hängen mag. Wenn man weniger schwere Körper zu wiegen hat, so hängt man die Waage an den von A entfernteren Ring auf, wie in Fig. 107; aber um Körper zu wiegen, deren Gewicht grösser ist, kehrt man das Instrument um, um es an dem andern Ring aufzuhängen und dadurch diesem Gewicht einen kleineren Hebelarm zu geben.

§. 77. **Die Zeigerwaage.** — Die Zeigerwaage hat, wie die Schnellwaage, den Zweck, das Gewicht eines Körpers ohne Anwendung bezeichneter Gewichte zu bestimmen. Fig. 108 stellt eine solche Zeigerwaage von kleinen Dimensionen vor, welche speciell dazu eingerichtet ist, Briefe zu wiegen und desshalb auch mit dem Namen Briefwaage bezeichnet wird. Der Winkelhebel ACB kann sich um den Punkt C drehen. Der Schwerpunkt G dieses Hebels sucht sich immer in die Vertikallinie zu stellen, welche durch den Drehungspunkt C hindurchgeht, wird aber durch die Wirkung des Gewichts der in dem Punkt A aufgehängten Waagschale E von dieser Linie fern gehalten. Wenn nun diese Waagschale noch belastet wird, so dreht sich der Hebel, und sein Ende B bewegt sich über einen Kreisbogen hin; dieser Bogen ist vorher so eingetheilt worden, dass man für jede Stellung des Punktes B das Gewicht des Körpers, welcher auf die Waagschale gelegt wurde, ablesen kann; die Eintheilung geschieht am einfachsten dadurch, dass man auf die Waagschale E verschiedene bekannte Gewichte legt und die Stellung des Punktes B für jedes derselben anmerkt. Die Verstärkung D, welche an dem Winkelhebel angebracht ist, hat den Zweck, die Entfernung des Schwerpunktes G vom Drehungspunkte C hinlänglich gross zu machen.

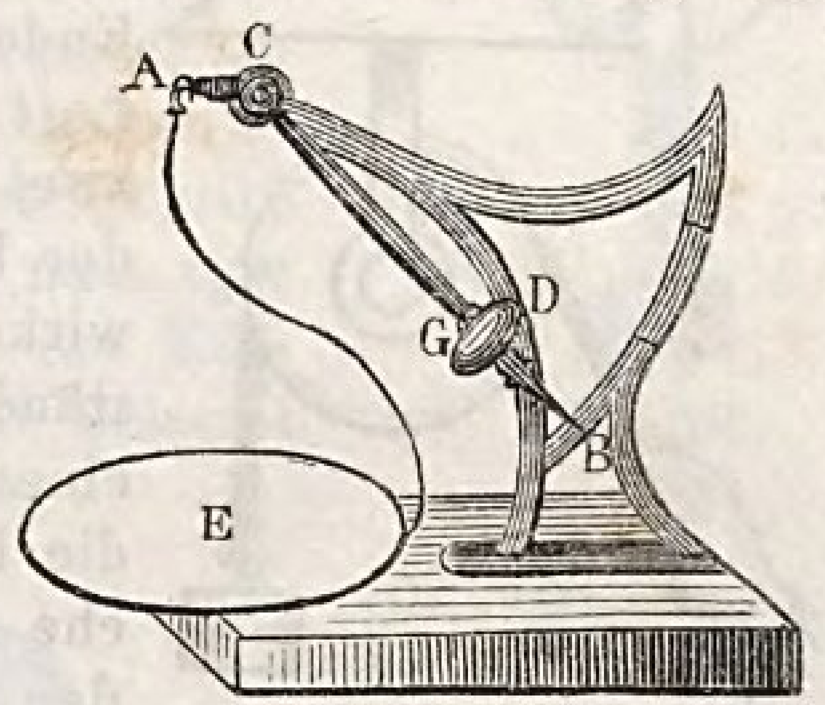


Fig. 108.

§. 78. **Die Rolle.** — Die Rolle ist eine kreisrunde Scheibe, welche an ihrem Rande ringsum mit einer Nuth, Hals genannt, versehen ist und sich um eine Achse, welche durch ihren Mittelpunkt hindurchgeht, frei drehen kann. Diese Achse ist entweder an der Rolle festgemacht und dreht sich dann an beiden Enden in zwei kreisrunden Löchern, die in einer Scheere angebracht sind, welche die Rolle von beiden Seiten umfässt; oder es ist diese Achse an der Scheere festgemacht und geht durch eine kreisförmige Oeffnung, welche durch den Mittelpunkt der Rolle gebohrt ist, sodass sich diese unabhängig von jener Achse drehen kann. Um die Rolle wird ein Seil gelegt, das einen Theil ihres Umfangs berührt und sich dann zu beiden Seiten nach der Richtung zweier Tangenten an ihre Peripherie entfernt.

Die Fig. 109 zeigt eine Rolle, deren Scheere festgemacht ist, und welche desshalb feste Rolle heisst. Das Seil, welches sich um sie legt, trägt an dem einen seiner Enden eine Last, während an dem andern Ende eine Zugkraft wirkt, welche jene Last im Gleichgewicht halten soll. Die zwei Kräfte, welche nach den Richtungen der beiden geradlinigen Theile des Seiles wirken, sind offenbar unter denselben Umständen, als wenn sie an den beiden Enden eines Winkelhebels angriffen, der durch die beiden Halbmesser gebildet wird, welche von dem Mittelpunkt der Rolle nach den zwei Berührungspunkten des Seils mit dem Umfang der Rolle gezogen werden. Da die Arme dieses Hebels einander gleich sind, so muss die Zugkraft gleich dem Gewicht des Körpers sein, den sie im Gleichgewicht hält.

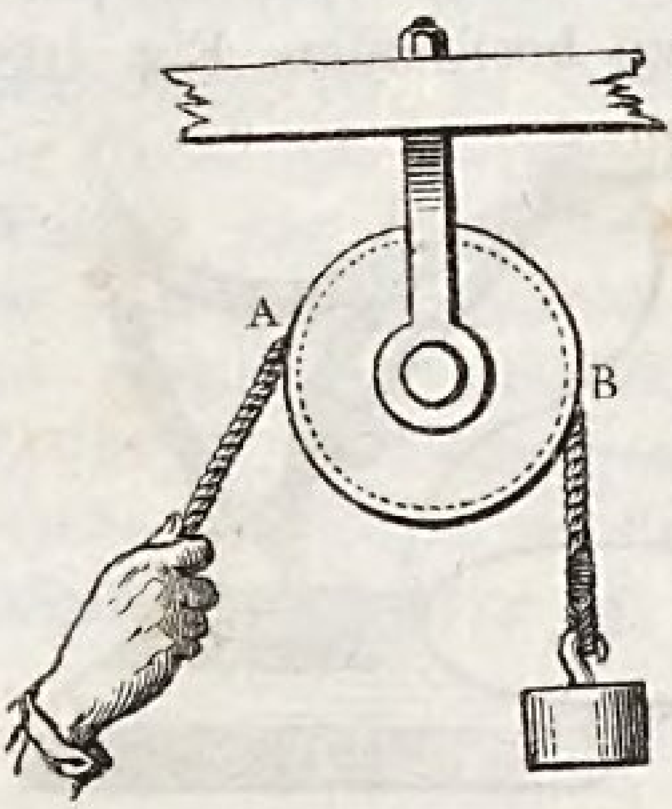
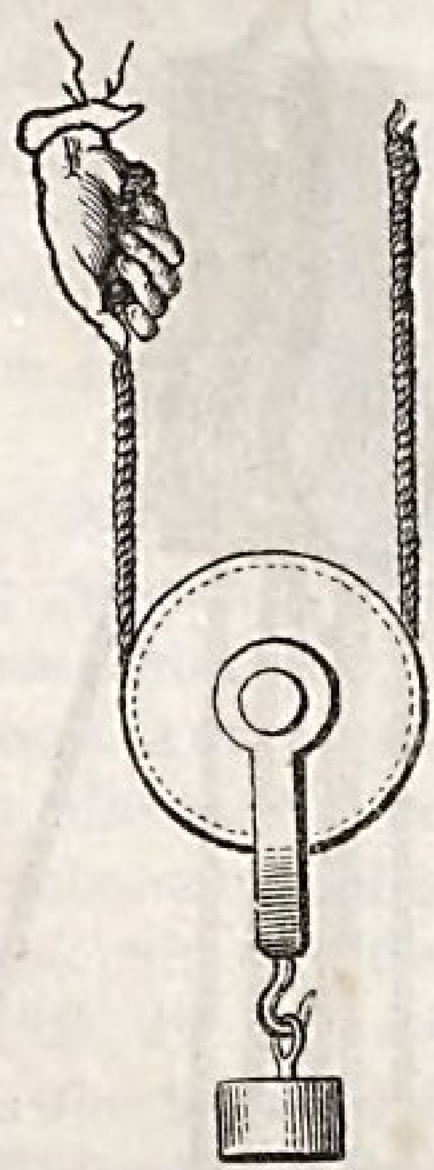


Fig. 109.

Es wird also durch Anwendung einer festen Rolle an Kraft nichts gespart. Im Gegentheil muss in Folge der Reibung der Achse und anderer Widerstände die anzuwendende Zugkraft immer etwas grösser als die Last sein. Aber die Rolle bietet den grossen Vortheil, dass die anzuwendende Kraft in beliebiger Richtung ausgeübt werden kann. Anstatt z. B. Steine, Mörtel etc. auf ein Baugerüste direct hinaufzuziehen, wendet man eine solche Rolle an, und es kann dann ein Arbeiter, unten stehend und von oben nach unten ziehend, die Last viel bequemer in die Höhe fördern. In gleicher Weise kann durch zweckmässige Benützung

einer oder mehrerer solcher Rollen ein Pferd, dessen Zugkraft nur in horizontaler oder nahezu horizontaler Richtung in Anwendung kommen kann, in den Stand gesetzt werden, Lasten vertikal in die Höhe zu fördern.

Die Rolle kann auch noch in der Weise angewandt werden, wie es Fig. 110 und 111 zeigt, und heisst dann lose Rolle. Die Scheere ist in diesem Fall mit einem Haken versehen, in welchem die Last aufgehängt werden kann. Das eine Ende des Seils ist in einem Punkt F befestigt; an dem andern ist eine Zugkraft angebracht. Im Falle des Gleichgewichts sind offenbar die Seilstücke, welche sich auf beiden Seiten von der Rolle entfernen, gleich stark gespannt, und die Mittelkraft ihrer Spannung muss gleich und entgegengesetzt dem Gewicht des Körpers sein, welchen die Rolle trägt. Im Falle der Fig. 110 ist also die Zugkraft gleich der Hälfte dieses Gewichtes. Im Falle der Fig. 111 verlängere man die beiden Seilstücke bis zu ihrem Durchschnittspunkt A und ziehe durch diesen Punkt eine Vertikale; auf derselben trage man eine Länge AD ab, welche das Gewicht des Körpers darstellt, mit welchem die Rolle belastet ist; endlich ziehe man DB, DC parallel zu den beiden Seilstücken, so repräsentiren die dadurch erhaltenen Linien AB, AC die Spannungen jener Seilstücke; die Zugkraft ist gleich einer von diesen Spannungen. Da aber die Spannungen der beiden Seilstücke gleich gross sein sollen, so müssen die Linien AB und AC gleich lang werden und daher gegen die Vertikale AD gleiche Neigung haben; diese Vertikale selbst muss folglich stets durch den Mittelpunkt der Rolle gehen. Der Druck, welchen die Achse der Rolle auszuhalten hat, bestimmt sich in beiden Fällen, bei der festen und losen Rolle, sehr leicht. In letzterem Falle ist er offenbar gleich


Fig. 110.

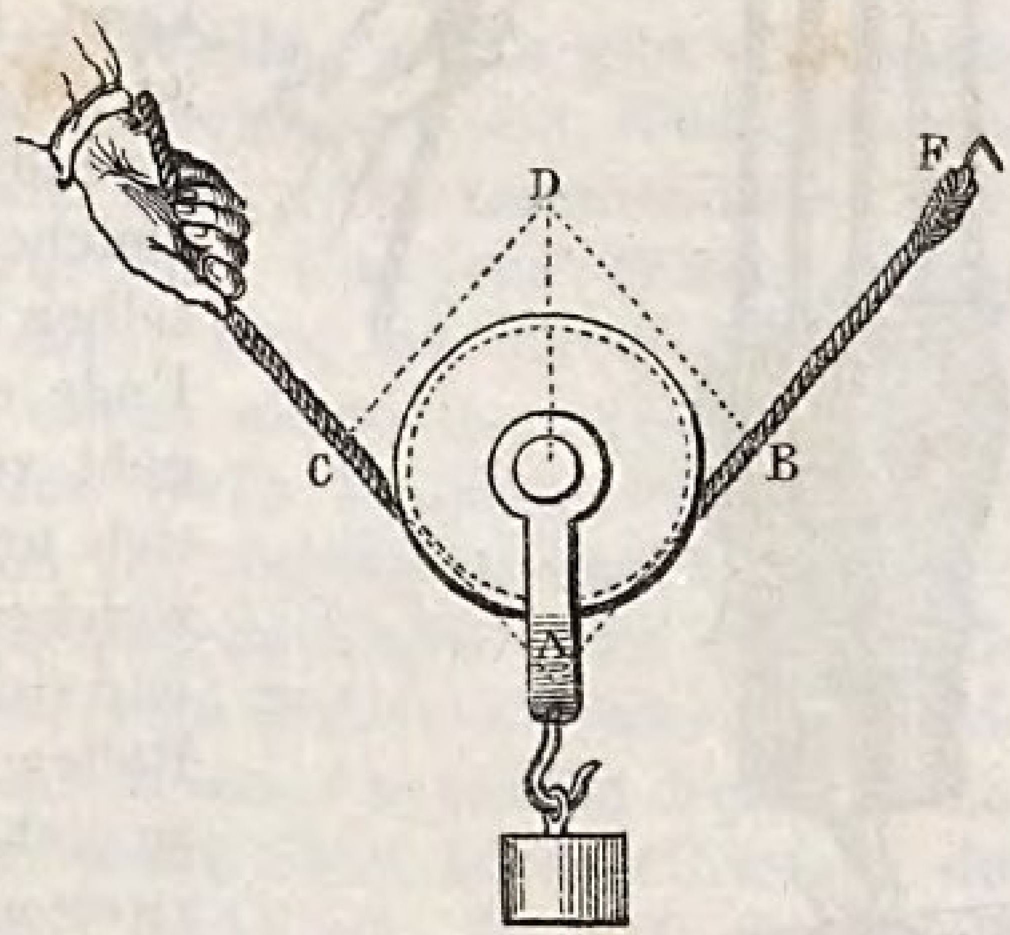
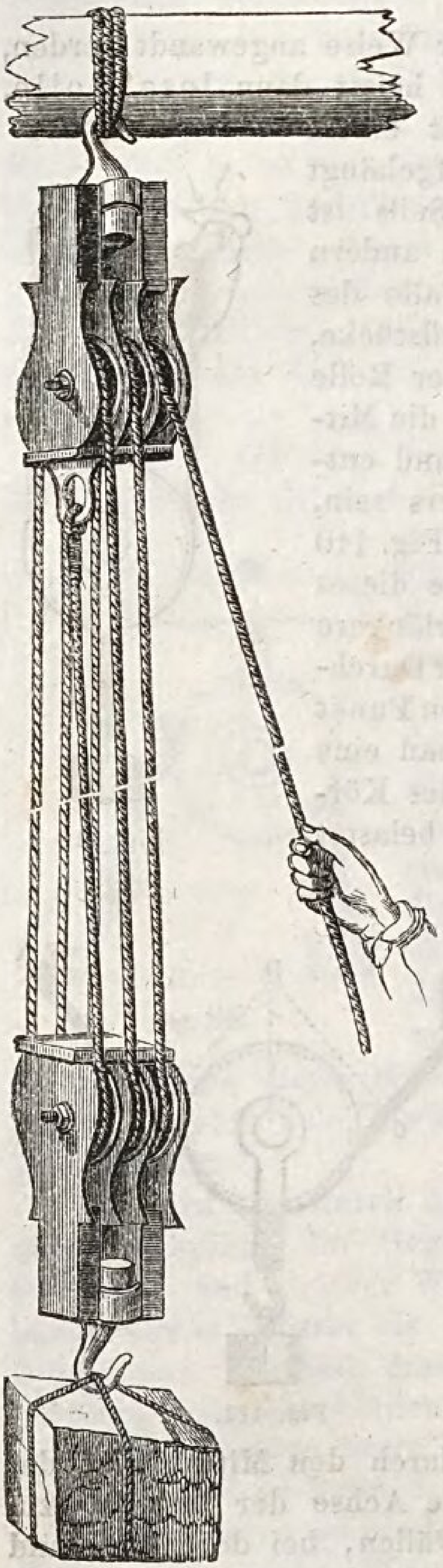


Fig. 111.

dem Gewicht der an der Scheere hängenden Last sammt dem Gewichte jener Scheere selbst. Im ersteren Falle ist er gleich der Resultante der an den beiden Seilenden wirkenden Kräfte, welche Resultante man leicht finden kann und die, wie leicht zu sehen, stets durch die Mitte der Achse der Rolle hindurchgeht.


Fig. 112.

§. 79. **Der Flaschenzug.** — Wenn mehrere Rollen in einem Gehäuse so mit einander verbunden sind, dass sie gleichsam eine gemeinschaftliche Scheere haben, so nennt man eine solche Zusammensetzung eine Flasche. Zwei solche Flaschen, von denen die eine fest, die andere lose ist, auf entsprechende Weise mittelst eines Seiles mit einander verbunden, bilden einen Flaschenzug. Die Fig. 112 zeigt ein solches System von zwei Flaschen, deren jede aus drei Rollen besteht, die um eine gemeinschaftliche Achse drehbar sind, jedoch so, dass sich jede Rolle unabhängig von den andern bewegen kann. Das Gehäuse der obern Flasche ist mittelst eines Hakens, in welchen sie endigt, festgemacht. An dem Ring, welcher sich an der untern Seite desselben Gehäuses befindet, ist das eine Ende eines Seiles befestigt; dasselbe geht von hier aus abwärts und legt sich um eine der untern Rollen, von welcher es wieder nach oben steigt und sich um den Hals einer der obern Rollen schlingt, um wieder abwärts zu gehen und sich um den Hals einer zweiten Rolle in der untern Flasche zu legen u. s. f., bis es sich, nachdem es sämmtliche Rollen umschlungen hat, von der letzten obern Rolle entfernt. An diesem zweiten Ende des Seils ist eine Zugkraft angebracht, welche

dem Gewichte des Körpers, der an dem Haken der untern Flasche hängt, das Gleichgewicht halten soll.

Wenn man das Seil seiner ganzen Länge nach verfolgt, so wird man leicht sehen, dass es überall dieselbe Spannung haben muss; denn je zwei Seilstücke, die über eine und dieselbe Rolle gehen, müssen gleich stark gespannt sein. Demnach wird also die untere Flasche von sechs Seilstücken, die als parallel betrachtet werden können, getragen, und es trifft also auf jedes derselben eine Spannung gleich dem sechsten Theil des Gewichtes des Körpers, der an der unteren Flasche hängt. Die Kraft, welche an dem freien Ende des Seils angebracht ist und welche die Spannung desselben bestimmt, hat daher dieselbe Grösse, d. h. sie ist sechsmal so klein, als das Gewicht, welchem sie das Gleichgewicht zu halten hat.

Mittelst des Flaschenzuges kann man, wie mit Hilfe des Hebels, mit einer gegebenen Kraft einem beliebig grossen Widerstand das Gleichgewicht halten. Man darf zu dem Ende nur in jeder der beiden Flaschen eine hinreichend grosse Anzahl von Rollen vereinigen; denn wir haben oben gezeigt, dass man, um die Grösse der Kraft zu erhalten, die einen gegebenen Widerstand zu überwinden vermag, diesen Widerstand mit der Gesammtzahl der Rollen dividiren muss. Freilich setzt die mit der Zahl der Rollen sich vergrössernde Reibung, sowie namentlich der aus der Steifigkeit der Seile entspringende Widerstand einer wirksamen Vermehrung der Rollen bald eine Grenze.

§. 80. **Das Rad an der Welle.** — Es gibt eine ganze Reihe von Maschinen, welche in Bezug auf die Wirkungsweise der Kräfte einander ganz gleich sind, trotz mannichfacher Verschiedenheiten in der Construction. Um jene Wirkungsweise kennen zu lernen, reicht es daher aus, sie bei einer einzigen näher zu betrachten, und als solche nimmt man gewöhnlich das sog. Rad an der Welle. Eine Welle W (Fig. 113) dreht sich um ihre Achse, bezüglich um die Zapfen A und B an ihren Enden, die in geeigneten Zapfenlagern liegen. Auf diese Welle ist, senkrecht auf ihre Achse, eine kreisrunde Scheibe R, das Rad, fest aufgekeilt, sodass sich keines von beiden drehen kann, ohne das andere mitzunehmen. Tangentiell an dem Umfang des Rades, in der Ebene desselben, wirkt eine Kraft P, vorgestellt durch die Gerade ab, etwa vermittelst eines Seiles, das um das Rad geschlungen ist und in der Richtung $a\,b$ gezogen wird. Eine ähnliche Kraft $Q = c\,d$ wirkt an dem Umfang der Welle, tangentiell an dieser und in einer Ebene, gleichfalls senkrecht

zu ihrer Achse. Die beiden sich kreuzenden Kräfte P und Q (§. 56) suchen die Maschine nach entgegengesetzten Richtungen zu drehen. Es ist die Frage, welche Grösse sie haben müssen, um sich das Gleichgewicht zu halten, und wie man den Druck findet, welchen die Zapfen A und B zu erleiden haben und mit welchem sie an ihre Lager angepresst werden.

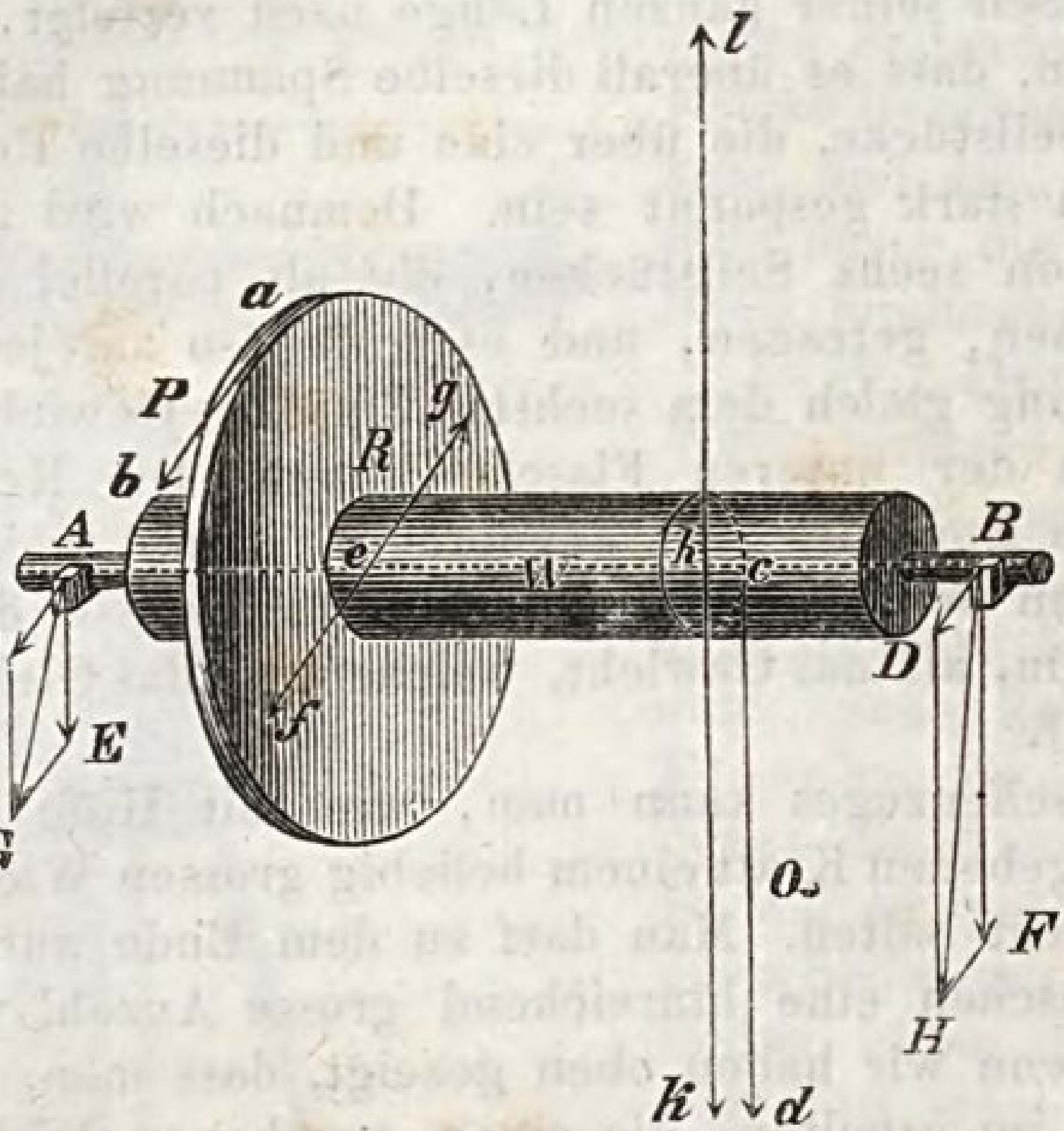


Fig. 113.

Man denke sich in dem Mittelpunkt des Rades zwei der Kraft P gleiche und zu ihr parallele, einander selbst aber entgegenwirkende Kräfte *ef* und *eg* angebracht. In gleicher Weise denke man sich in dem Punkte *h* der Wellenachse, wo die auf ihr senkrechte Ebene, in welcher Q liegt, sie schneidet, zwei der Kraft Q gleiche und parallele, aber einander selbs twieder entgegengesetzte Kräfte *hk* und *hl* wirken. Durch diese neuhinzugekommenen vier Kräfte wird offenbar in dem Verhalten der ganzen Maschine nichts gestört, da sie sich selbst das Gleichgewicht halten. Nun bilden die beiden Kräfte *ab* und *eg* einen Drehzwilling in einer zur Achse der Welle senkrechten Ebene, der die Maschine in der einen Richtung zu drehen sucht; und die Kräfte *cd* und *hl* einen zweiten Drehzwilling in einer zu jener parallelen Ebene, der die Maschine in der entgegengesetzten Richtung zu drehen strebt. Die Kräfte *ef* und *hk*, die noch übrig sind, können offenbar das Wellrad nicht drehen. Wenn dasselbe folglich im Gleichgewicht sein soll, so müssen es jene beiden Drehzwillinge sein, was, da sie in parallelen Ebenen liegen, nach §. 56 der Fall ist, wenn ihre Drehmomente einander gleich oder wenn die Kräfte P und Q den Armen der Drehzwillinge umgekehrt proportionirt sind. Die Arme der Drehzwillinge sind aber nichts anders, als die Halbmesser des Rades und der Welle. Das Wellrad ist folglich im Gleichgewicht, wenn die Kräfte P und Q am Rad

und an der Welle sich umgekehrt wie die Radien oder Durchmesser der letzteren verhalten.

Zu diesem Resultate wäre man auch gelangt, wenn man sich die beiden Kräfte P und Q in eine einzige, zur Wellachse senkrechte Ebene verlegt gedacht hätte. Man hätte sie dann als Kräfte an einem Winkelhebel ansehen können, dessen Arme bez. die Radien des Rades und der Welle gewesen wären. Aber wir hätten auf diesem Wege den Druck auf die Zapfenlager nicht finden können. Dieser bestimmt sich durch die noch übrigen beiden Kräfte *ef* und *hk*. Man zerlege jede derselben in zwei zu ihr parallele und gleichgerichtete, an den Zapfen A und B angreifende Kräfte auf die bekannte Weise, indem man, um die Grösse der Seitenkräfte zu erhalten, die Mittelkräfte im umgekehrten Verhältniss der Entfernungen A*e* und *e*B, bez. A*h* und *h*B theilt. So erhält man die vier Kräfte AC und BD, AE und BF. — Die beiden in demselben Punkt A angreifenden derselben, AC und AE, vereinigen sich in eine Mittelkraft, AG, die den auf das Lager A ausgeübten Druck vorstellt. Die andern beiden, BD und BF, geben als Resultante den auf das Lager B ausgeübten Druck BH.

Wenn die Welle des Wellrads horizontal liegt, so heisst es gewöhnlich Haspel oder Winde; und zwar Radhaspel oder Hornhaspel, je nachdem die Kraft an einem wirklichen Rade oder auch an blosen Speichen oder an einem Horne (Kurbel) wirkt. Bei vertikaler Welle heisst das Wellrad gewöhnlich stehende Winde; und man unterscheidet hiebei wieder, je nach der Wirkungsweise der Kraft und der Construction der Maschine, Göpel, Lauf- oder Tretrad etc. etc. Bei geneigter Welle endlich erhält das Rad an der Welle gewöhnlich den Namen Tretscheibe. Eine besondere Art von Haspel bildet die sog. chinesische oder Gegenwinde. — Einige der wichtigsten dieser Maschinen wollen wir nun kennen lernen.

§. 81. **Der Haspel oder die Winde** besteht aus einem Cylinder A (Fig. 114), der Welle, manchmal von Gusseisen, häufiger aber von Holz, welcher auf beiden Seiten zwei Zapfen B trägt, die in festen Lagern C ruhen.

Die Welle, welche blos in ihren beiden Zapfen unterstützt ist, kann sich um ihre Achse drehen. An ihrem Umfange ist das eine Ende eines Seils festgemacht, dessen anderes Ende an einer Last befestigt ist, welche emporgehoben werden soll. Die Welle wird gedreht, indem man auf die Enden von Hebeln wirkt, welche an ihr festgemacht sind, oder die auch wohl nach ein-

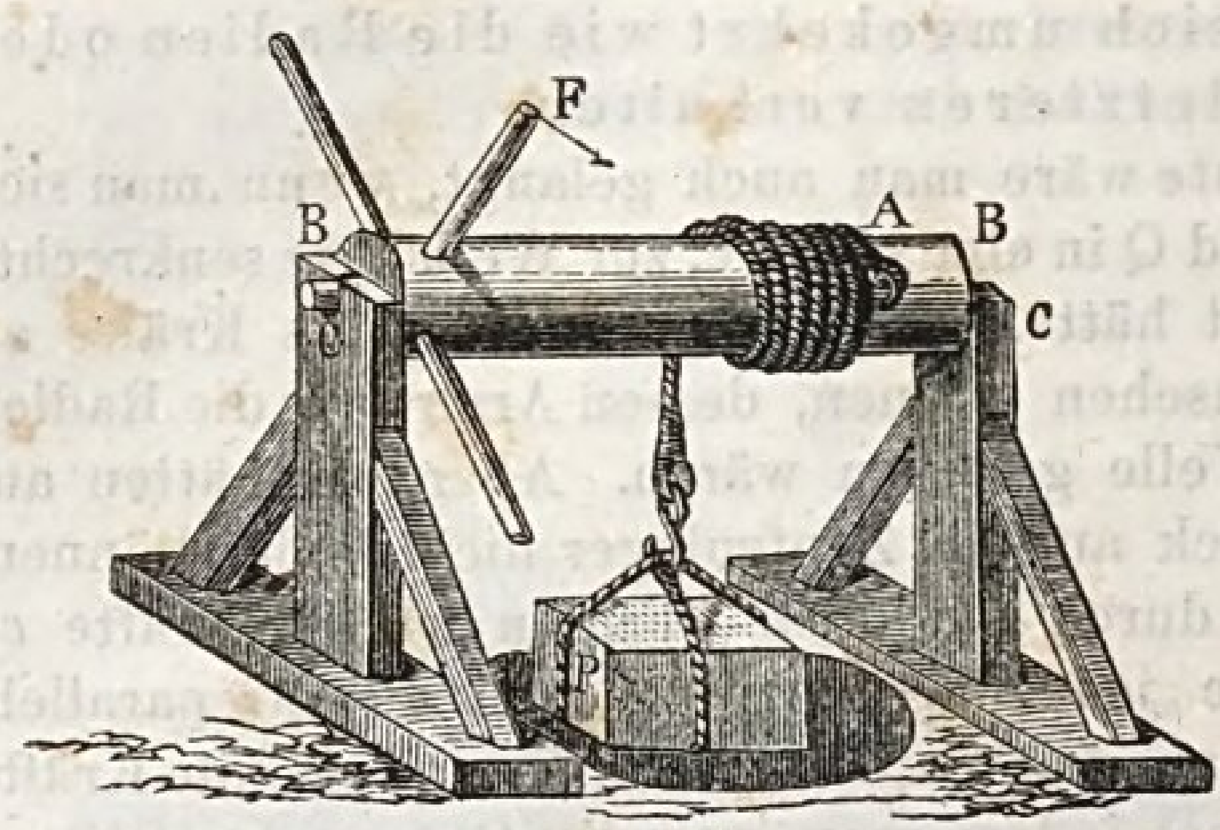


Fig. 114.

ander in Löcher gesteckt werden, welche durch sie hindurch gehen; durch diese Drehung rollt sich das Seil auf und zieht den Körper, welcher an ihm befestigt ist, mit in die Höhe.

Das Verhältniss zwischen dem Gewichte des zu hebenden Körpers und der dazu aufzuwendenden Kraft findet sich unmittelbar aus dem im vorigen §. Gesagten. Wir können, wie dort gezeigt wurde, annehmen, dass das Seil, welches den Körper trägt, und der Hebel, an welchem die Kraft wirkt, in derselben Ebene senkrecht auf der Achse der Welle gelegen sind. Alsdann befinden sich aber die beiden Kräfte P und F (Fig. 115) offenbar unter denselben Bedingungen, als wenn sie an den beiden Enden eines Winkelhebels MON angebracht wären; sie müssen sich also, um im Gleichgewicht zu sein, umgekehrt wie der Halbmesser OM der Welle und die Länge ON des Hebels verhalten. Wenn z. B. ON fünfmal so gross als OM ist, so muss die Kraft F den fünften Theil des Gewichtes P betragen. In Bezug auf den Druck gegen die Zapfenlager ist dem im vorhergehenden §. Gesagten nichts mehr hinzuzufügen.

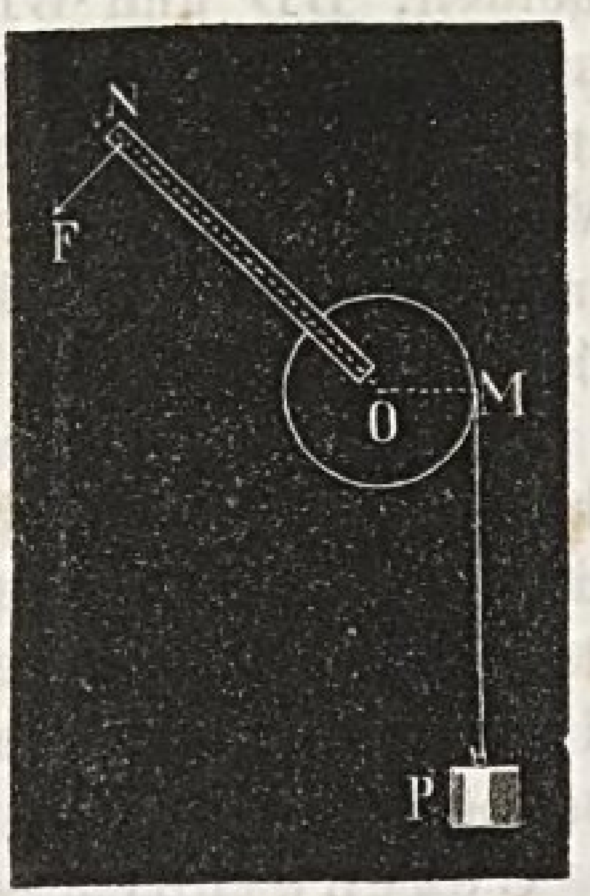


Fig. 115.

§. 82. **Die Erdwinde** hat einen vertikal stehenden Wellbaum (Fig. 116); sie wird besonders in Häfen, auf Schiffen angewandt, um in horizontaler oder doch nahezu horizontaler Richtung eine bedeutende Kraft auszuüben. Der obere Zapfen ist über das Lager hinaus, in welchem er sich dreht, verlängert, und in dieser Verlängerung sind, in regelmässiger Vertheilung um ihren Umfang, vier, sechs, selbst 8 Hebel angebracht. Das Gerüste, welches die beiden Zapfenlager trägt, und welches einfach auf den Boden gestellt ist, muss während des Arbeitens an der Winde fest stehen bleiben; zu dem Ende ist es mit Seilen an Pflöcken befestigt, die fest in den Boden eingeschlagen

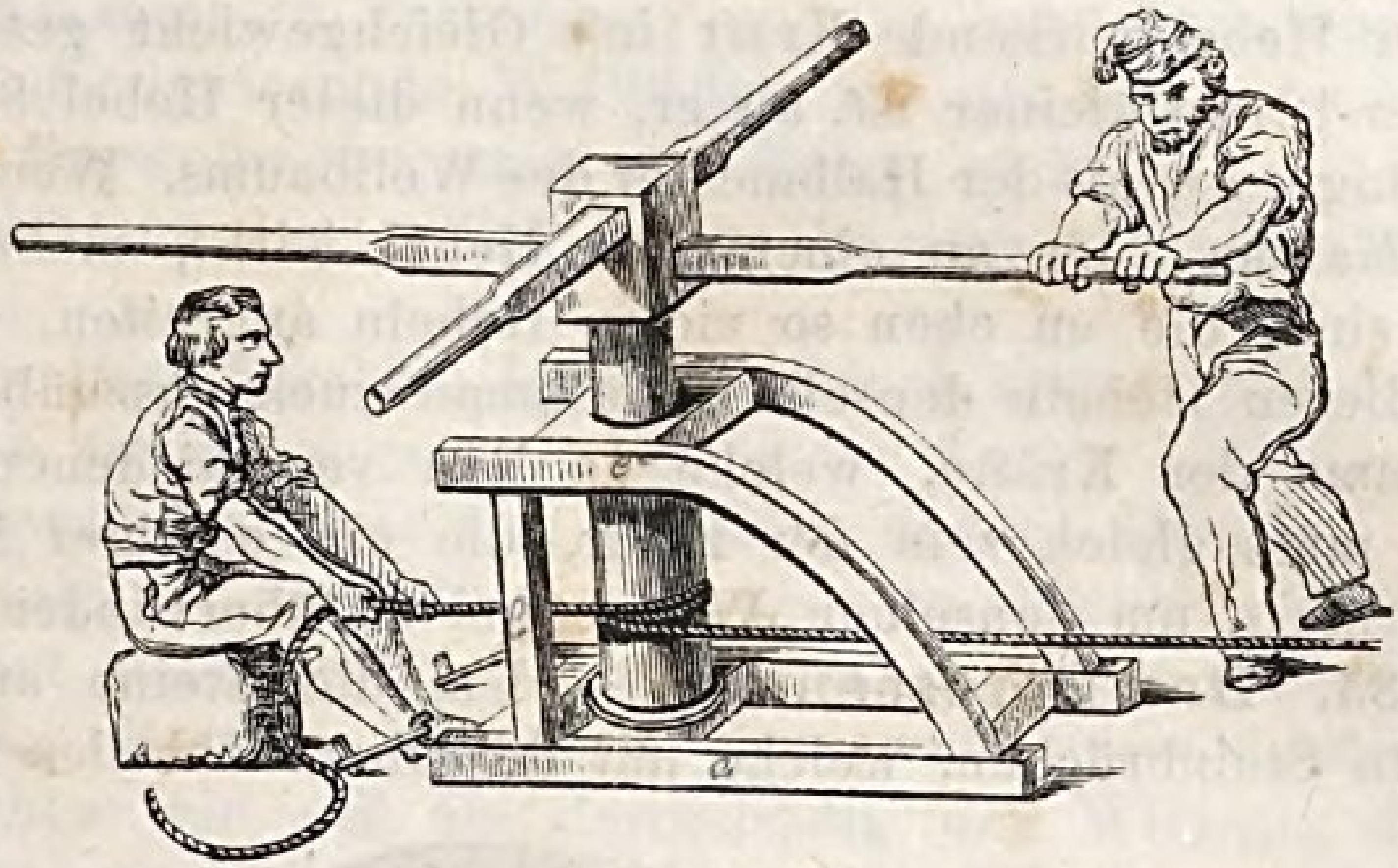


Fig. 116.

sind. Da der Wellbaum gewöhnlich niedrig ist, während das Tau, an welchem eine Zugkraft ausgeübt werden soll, oft eine bedeutende Länge hat, so kann dasselbe nicht, wie bei dem im vorigen Paragraph besprochenen Haspel, nach und nach auf den Wellbaum aufgewickelt werden. Man schlingt es vielmehr nur zwei oder dreimal um den Wellbaum herum und lässt alsdann sein freies Ende durch die Hände eines Mannes gehen, welcher daran mit einer Kraft zieht, welche hinreicht, um das Gleiten des Taues über die Oberfläche des Wellbaums zu verhindern. Auf diese Art wird also das Tau, wenn der Wellbaum durch Männer, welche an den Enden der Hebel wirken, herumgedreht wird, einfach in Folge der Reibung mit fortgezogen, und während es sich auf der einen Seite aufwickelt, wickelt es sich auf der andern Seite um eben so viel wieder ab, sodass stets nur ein und dieselbe Länge des Taues um den Wellbaum geschlungen ist. Um die Adhäsion des Seiles an der Oberfläche der Welle zu vergrössern und damit dem Abgleiten desselben einen grösseren Widerstand entgegen zu setzen, versieht man häufig die Oberfläche des Wellbaums der Länge nach mit Cannelirungen.

Was das Verhältniss betrifft, welches zwischen dem zu überwindenden Widerstand und der Kraft stattfindet, welche, an dem Ende eines der Hebel wirkend, jenen Widerstand überwinden soll, so wird derselbe eben so gefunden, als wenn es sich um eine Welle mit horizontaler Achse handelte. Man wird leicht einsehen, dass die Zugkraft, welche durch den Mann ausgeübt wird, der an dem sich abwickelnden Theil des Seiles zieht, einen ihr gleichen Theil des Gesammtwiderstands das Gleichgewicht hält. Der Ueberschuss dieses Widerstands wird durch eine, an dem Ende

eines der Hebel wirkende Kraft in's Gleichgewicht gesetzt, die 8, 10 oder 12mal kleiner ist, als er, wenn dieser Hebel 8, 10 oder 12mal länger ist, als der Halbmesser des Wellbaums. Wenn anstatt eines Mannes, der an einem der Hebel wirkt, mehrere vorhanden sind, die an eben so vielen Hebeln angreifen, so haben sie an diesen Hebeln denselben Gesammtdruck auszuüben; d. h. die Summe der Kräfte, welche an den verschiedenen Hebeln wirken, muss gleich sein der Kraft, die ein einziger Mann anwenden muss, um denselben Widerstand zu überwinden.

§. 83. **Das Sprossenrad.** — Um die Steine aus unterirdischen Steinbrüchen, welche mit der Oberfläche der Erde nur

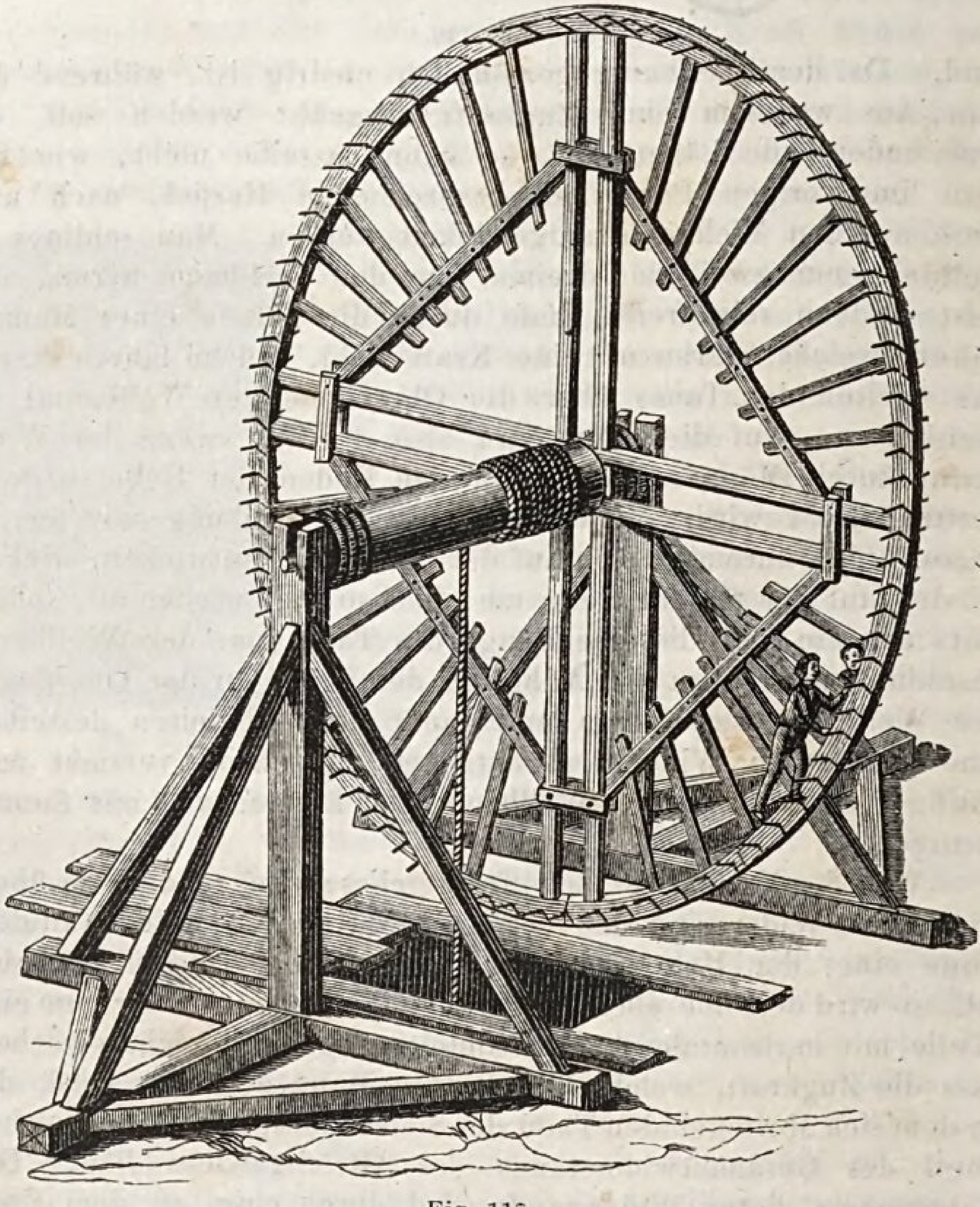


Fig. 117

durch Schachte in Verbindung stehen, heraufzufördern, wendet man häufig horizontale Wellbäume an, auf welche man mittelst grosser Sprossenräder, statt der Hebel, wirkt (Fig. 117). Solche Räder sieht man namentlich in der Umgegend von Paris in grosser Anzahl.

Um diese Maschine in Thätigkeit zu setzen, steigen mehrere Arbeiter die Sprossen wie auf einer Leiter hinauf. In Folge ihres Gewichtes dreht sich das Rad; der an dem Seile hängende Stein steigt in die Höhe, und wenn er über der Mündung des Schachtes angekommen ist, verdeckt ein Arbeiter diese Oeffnung mit starken Brettern, auf welche dann der Stein herabgelassen wird.

Gehen wir auf die Betrachtung der Wirkung der Kräfte an dieser Maschine etwas näher ein. Wenn ein Mensch, um einen Widerstand zu überwinden, einen Druck oder Zug ausübt, so kann er dabei, je nach der Grösse des Widerstandes, eine grössere oder geringere Kraft entwickeln. Dies ist hier nicht so. Die Kraft, mit welcher der Mann auf das Rad wirkt, ist das Gewicht seines Körpers, und es ist ihm nicht möglich, diese Kraft nach Belieben zu ändern; aber er hat es in seiner Gewalt, den Hebelarm, auf den jene Kraft wirkt, grösser oder kleiner zu machen, und durch dieses Mittel wird es ihm möglich, dem zu hebenden Gewichte das Gleichgewicht zu halten. Nehmen wir der Einfachheit halber an, dass nur ein Arbeiter die Sprossen des Rades hinaufsteige, und dass sein Gewicht hinreichend sei, um den am Seil aufgehängten Stein emporzuheben. Dann sieht man leicht, dass, wenn sich der Arbeiter im Punkte A (Fig. 118) befindet, sein Gewicht als eine Kraft zu betrachten ist, welche an dem Hebelarm ON wirkt, und dass sich dieser Hebelarm vergrössert, wenn der Arbeiter von A nach B emporsteigt. Man begreift also, dass es demselben möglich ist, eine solche Stellung auf dem Rad einzunehmen, dass er dem Gewichte des Steins das Gleich-

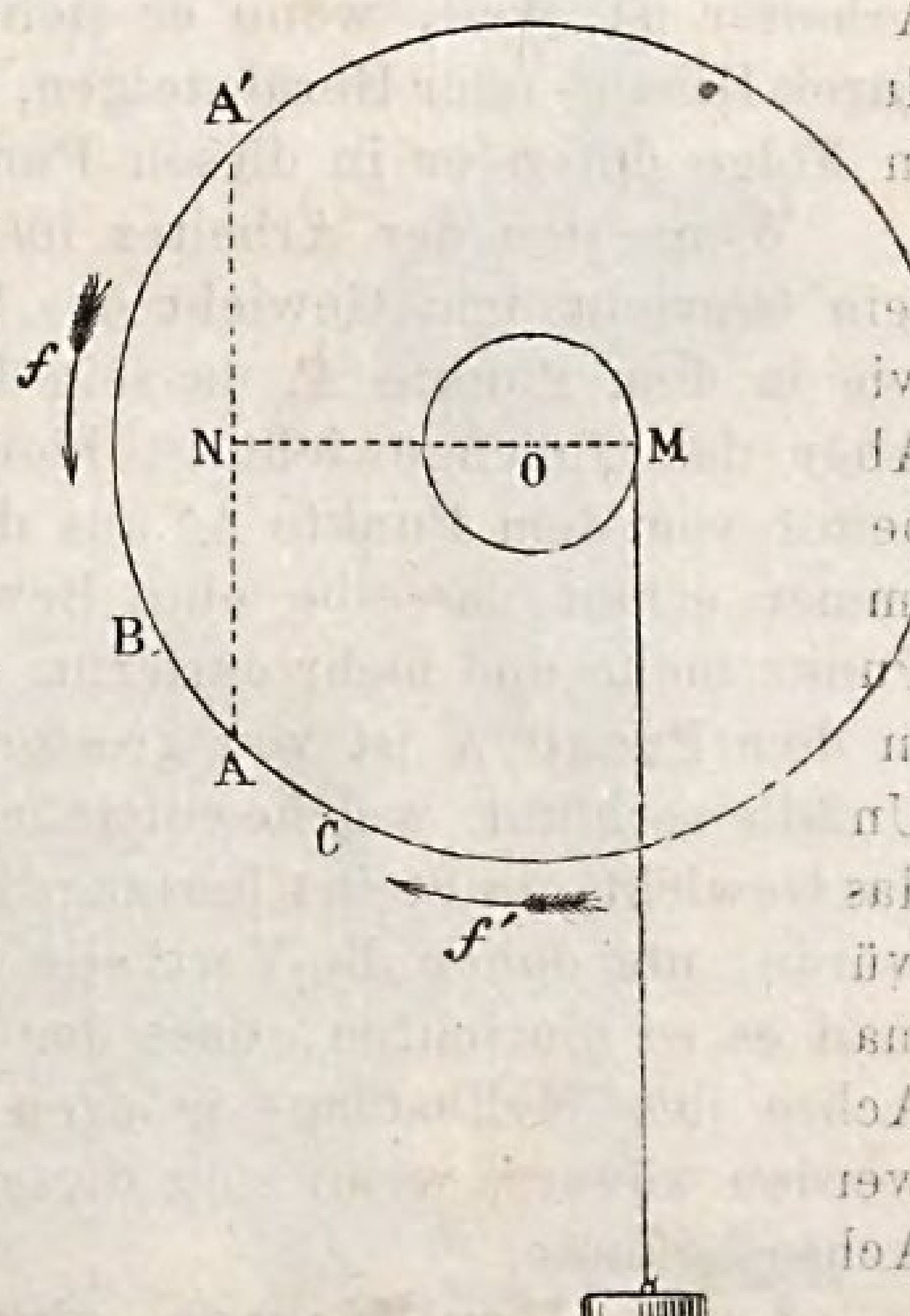


Fig. 118.

gewicht halten kann. Zu dem Ende muss sich sein Gewicht zum Gewichte des Steins umgekehrt wie die Hebelarme ON und OM verhalten. Es sei A die Stelle, welche der Arbeiter einnehmen muss, um das Gleichgewicht herzustellen. Wenn er nach B hinaufsteigt, so vergrössert sich der Hebelarm, an welchem er wirkt; sein Gewicht, welches sich nicht vermindert hat, ist daher zu gross, um dem Widerstand blos das Gleichgewicht zu halten; es reicht schon ein Theil desselben hin, um dieses Gleichgewicht herzustellen, der andere Theil veranlasst die Bewegung des Rades im Sinne des Pfeiles f. Dadurch wird der Arbeiter wieder nach A zurückgeführt; wenn er daher fortfährt emporzusteigen, so dreht sich das Rad fortwährend herum, und der Stein wird dadurch bis zur Mündung des Schachtes emporgehoben.

Wenn der Arbeiter anstatt aufwärts zu steigen von A nach C herabsteigt, so verkleinert er dadurch den Hebelarm, auf welchen er wirkt; sein Gewicht reicht daher nicht mehr hin, um dem Stein das Gleichgewicht zu halten; das Rad bewegt sich in entgegengesetzter Richtung, im Sinne des Pfeiles f′, wodurch der Arbeiter wieder in den Punkt A zurückkommt. Man sieht also, dass der Punkt A eine stabile Gleichgewichtsstellung für den Arbeiter ist, weil, wenn er sich von demselben entfernt, sei es durch Hinauf- oder Herabsteigen, das Rad eine Bewegung annimmt, in Folge deren er in diesen Punkt A zurückgeführt wird.

Wenn sich der Arbeiter in dem Punkte A′ befindet, so hält sein Gewicht dem Gewicht des Steines auch das Gleichgewicht, wie in dem Punkte A, da sein Hebelarm dieselbe Linie ON ist. Aber das Gleichgewicht ist hier ein labiles; denn ob der Arbeiter von dem Punkte A′ aus das Rad hinauf- oder hinabsteigt, immer erhält dasselbe eine Bewegung, welche ihn von diesem Punkt mehr und mehr entfernt. Die Stabilität des Gleichgewichts in dem Punkte A ist von grosser Wichtigkeit, indem sie schwere Unfälle verhütet, welche entstehen könnten, wenn das Rad, durch das Gewicht des Steins herumgedreht, den Arbeiter mit fortreissen würde; um daher die Vortheile dieser Stabilität zu sichern, muss man es so einrichten, dass der Punkt A beträchtlich unter der Achse des Wellbaumes gelegen ist, weil sie leicht aufgehoben werden könnte, wenn sich dieser Punkt nur wenig unterhalb der Achse befände.

§. 84. **Der Riemen ohne Ende.** — Wenn man eine Rotationsbewegung von einer Welle auf eine andere, ihr parallele übertragen will, und es sind diese Wellen nicht sehr nahe bei

einander, so wendet man häufig einen Riemen ohne Ende an, welcher um zwei Rollen, Riemenrollen, Trommeln, auch Riemscheiben genannt, die auf den beiden Wellen befestigt sind, geschlungen ist. Diese Art der Uebertragung der Bewegung wird besonders in Fabriken angewandt, wo mehrere Maschinen, welche zur Ausführung verschiedener Arbeiten bestimmt sind, ihre Bewegung von einer einzigen Kraftmaschine, einem Wasserrad z. B. oder einer Dampfmaschine, erhalten. Die Kraftmaschine dreht eine oder mehrere Wellen, welche sich durch die ganze Länge der Werkstätte erstrecken; auf diesen sog. Transmissionswellen sind in gewissen Entfernungen Riemenrollen mit Riemen angebracht, welche die verschiedenen Arbeitsmaschinen, Drehbänke, Hobelmaschinen, Spinnmaschinen etc., bewegen sollen. Die Fig. 119 zeigt eine Bewegungsübertragung dieser Art, wo mittelst Riemen von der Transmissionswelle AB aus ein Schleifstein gedreht werden soll. — Es ist häufig nothwendig, die Bewegung der mit dem Riemen getriebenen Maschine schnell abstellen zu können. Dazu dient eine einfache Vorrichtung, welche gleichfalls aus Fig. 119 ersichtlich ist. Wenn man das Ende C des Hebels CDE, der um den Punkt D drehbar ist, nach links hinüber rückt, so wird die Gabel an dem andern Ende E des Hebels, in welcher der Riemen läuft, nach rechts geführt, und der Riemen, durch diese Gabel seitwärts mit fortgezogen, kommt auf eine zweite Rolle zu liegen, welche dicht neben derjenigen ist, auf der er sich ursprünglich befand. Diese zweite Rolle, gewöhnlich Leerrolle

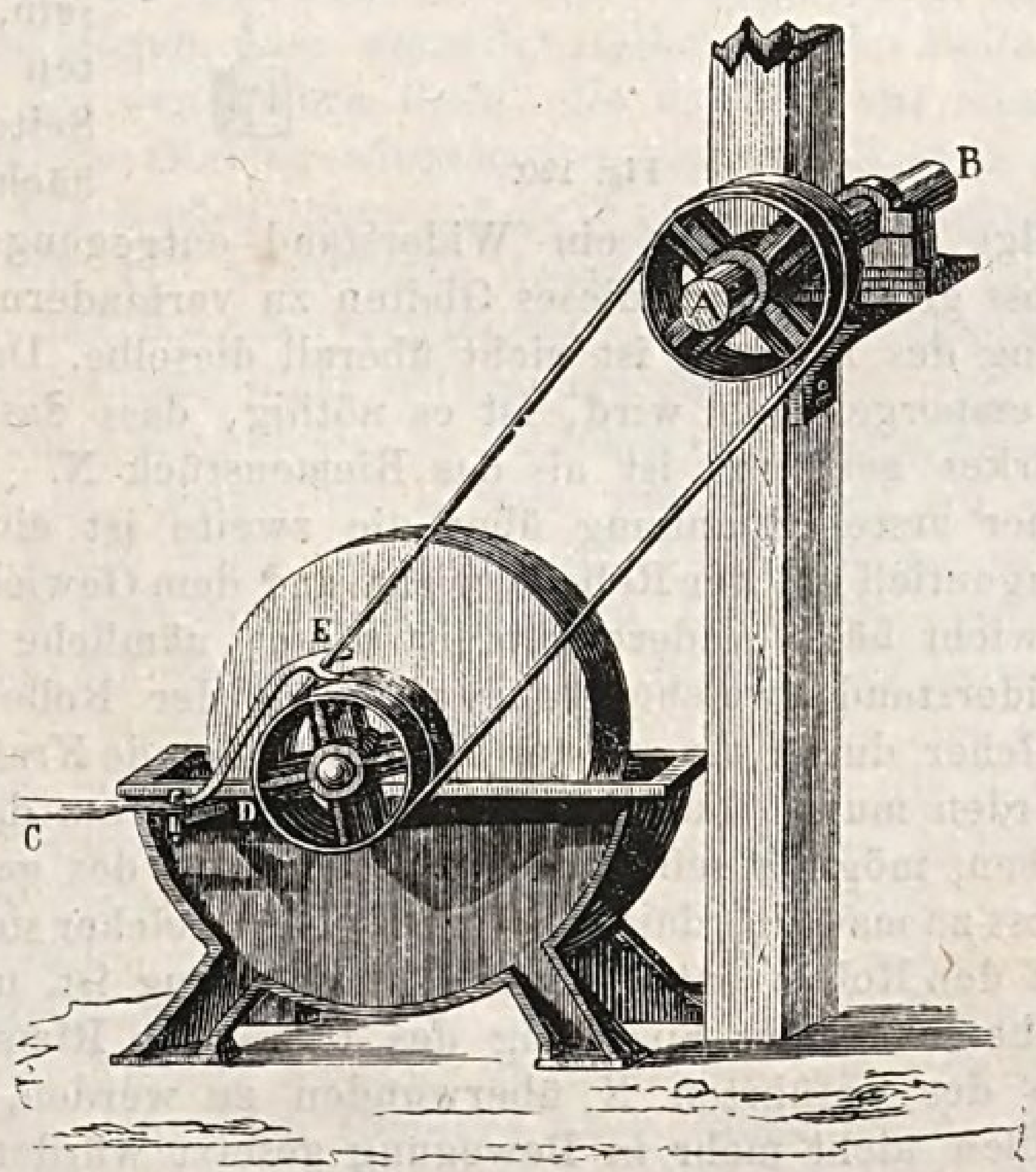


Fig. 119.

genannt, ist auf der Welle, an welcher sie sitzt, nicht festgemacht, sondern kann sich im Gegentheil frei um diese Welle drehen; der Riemen bewegt sie daher allein, ohne dass die Welle an der Bewegung theilnimmt, und der Schleifstein bleibt stehen. Will man ihn wieder in Bewegung setzen, so rückt man das Ende des Hebels nach rechts; dadurch bekommt der Riemen wieder seine vorige Lage und dreht den Schleifstein mit herum.

Um uns über die Art und Weise, wie die Kräfte durch Vermittlung des Riemens ohne Ende wirken, Rechenschaft zu geben, denken wir uns, dass man ein Gewicht P (Fig. 120), das an einem um die Welle A geschlungenen Seil befestigt ist, emporheben wolle. Zu diesem Zwecke wirke man auf die Kurbel B, wodurch die Rolle C herumgedreht wird, deren Bewegung sich der Welle A mittelst des Riemens MN mittheilt. Der Riemen muss seiner ganzen Länge nach gespannt sein, damit dem Gleiten seiner innern Seite auf den Oberflächen der Rollen in Folge der Reibung ein Widerstand entgegengesetzt wird, der gross genug ist, um dieses Gleiten zu verhindern. Aber die Spannung des Riemens ist nicht überall dieselbe. Damit das Gewicht P emporgehoben wird, ist es nöthig, dass das Riemenstück M stärker gespannt ist als das Riemenstück N. Der Ueberschuss jener ersten Spannung über die zweite ist eine Kraft, welche tangentiell an der Rolle D wirkt und dem Gewichte P das Gleichgewicht hält. Andererseits ist dieser nämliche Ueberschuss ein Widerstand, welcher tangentiell an der Rolle C angreift und welcher durch die an der Kurbel wirkende Kraft F überwunden werden muss. Zugleich ist klar, dass es, um das Gewicht P zu heben, möglich sein muss, die Spannung des ganzen Riemens so gross zu machen, dass der Widerstand, welcher sich seinem Gleiten auf den Rollen entgegensetzt, stark genug ist, um nicht von dem Ueberschuss der Spannung des führenden Riementheils M über die des geführten N überwunden zu werden, weil sonst die Rollen nicht mehr in Bewegung gesetzt würden. — Wenn nun der Arm der Kurbel B z. B. doppelt so gross, als der Halbmesser

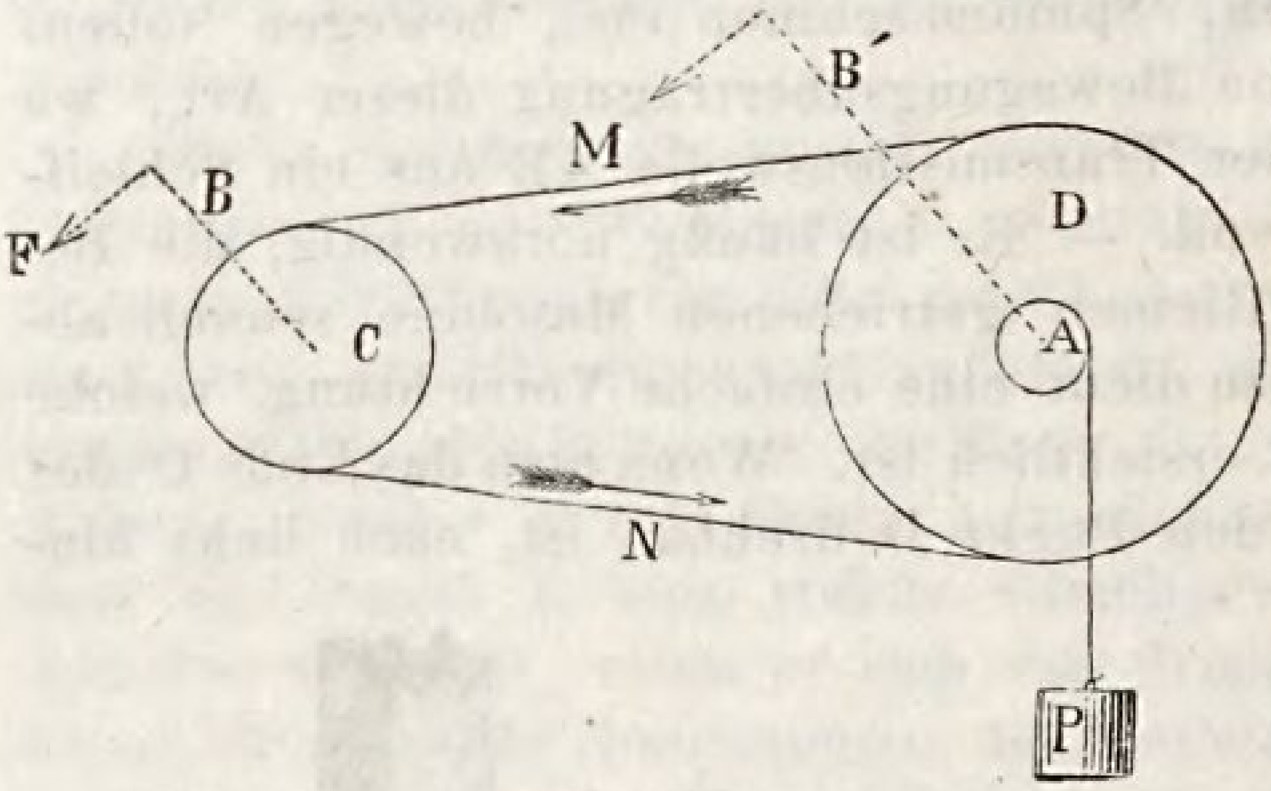


Fig. 120.

der Rolle C ist, so muss die Differenz der Spannungen der Riemenstücke M und N das doppelte der Kraft F sein. Diese Differenz, indem sie an der Rolle D angreift, bringt offenbar dieselbe Wirkung hervor, als eine der F gleiche Kraft, die an einer Kurbel B′ angreift, deren Arm doppelt so gross als der Halbmesser der Rolle D ist. Es ist also ganz gleichgiltig: ob die Kraft F an der Kurbel B angreift, um die Welle A mit Hilfe des Riemens zu drehen, oder ob sie an der Kurbel B′ wirkt, um direct die Welle A in Drehung zu versetzen; sie wird immer im Stande sein, das nämliche Gewicht P emporzuheben.

Beachtet man nun, dass die Länge der Arme der Kurbeln B und B′ in demselben Verhältniss stehen, wie die Halbmesser der Rollen C und D, so sieht man leicht, dass durch die Anwendung des Riemens ohne Ende als Zwischenglied für die Wirkung der Kraft F dasselbe Ziel erreicht wird, als durch eine Vermehrung des Hebelarms dieser Kraft F im Verhältniss der Halbmesser der Rollen C und D. Wenn daher der Halbmesser der Rolle D das doppelte, dreifache, vierfache etc. des Halbmessers der Rolle C ist, so kann die Kraft F das doppelte, dreifache, vierfache etc. des Gewichts heben, welches sie heben würde, wenn sie an derselben Kurbel direct auf die Welle A wirken würde. Es ist wohl nicht nöthig, hinzuzufügen, dass, wenn der Halbmesser der Rolle D kleiner wäre als der der andern Rolle, die Kraft F nur einem geringeren Gewicht das Gleichgewicht halten könnte, als wenn sie mittelst der nämlichen Kurbel direct auf die Welle A wirken würde.

Bei der in Fig. 119 getroffenen Anordnung bewegen sich die beiden durch den Riemen verbundenen Wellen in gleicher Drehrichtung. Wenn man diese entgegengesetzt haben will, so wendet man gekreuzte Riemen an, die zwischen den Riemscheiben verschränkt sind. — Anstatt der Riemen wendet man, wo die zu übertragende Kraft nicht zu gross ist, auch Schnüre oder Saiten an, wie z. B. bei kleineren Drehbänken, bei der Bewegung der Spindeln auf den Spinnmaschinen etc. In diesem Fall heissen die Rollen, wenn sie ziemlich klein sind, W i r t e l n; sie sind auf ihrem Umfang mit einer Nuth versehen, in welcher die Saite läuft. Bei den Riemscheiben dagegen hat die Praxis gezeigt, dass sie an ihrem Umfang etwas gewölbt werden müssen, wenn ein häufiges Herabfallen des Riemens vermieden werden will. — Da, wo die zu übertragenden Kräfte sehr gross sind, kommen auch wohl statt der Riemen K e t t e n in Gebrauch, die sich mit ihren eigenthümlich geformten Gliedern über Zähne legen mit denen die Rollen, jetzt Kettenräder genannt, versehen sind. Man

wendet diese Bewegungsübertragung übrigens auch da an, wo man versichert sein will, dass ja kein Gleiten stattfindet, wie z. B. bei Thurmuhren. Endlich ist es nicht gerade nothwendig, dass die beiden, mit einander zu verbindenden Wellen parallel sind, um die Bewegung von der einen zur andern mittelst Riemen übertragen zu können. Sie dürfen auch kleine Winkel miteinander bilden, wenn man sie nur zweckmässig anordnet, und wo es nothwendig ist, Leitrollen anwendet, welche dem Riemen zwischen ihnen die nöthige Richtung geben.

Aus den obigen Entwicklungen ist klar, dass zur Uebertragung einer gewissen Kraft von einer Welle auf die andere, oder besser, zur Ueberwindung eines gewissen Widerstands an einer Welle durch eine Kraft an einer andern, mit ihr durch Riemenbetrieb verbundenen, der Riemen eine gewisse Spannung erhalten muss, um ein Gleiten desselben auf den Rollen zu verhindern. Um diese Spannung auszuhalten muss er eine gewisse Breite und Dicke bekommen, und es richten sich also die Dimensionen des Riemens nach der Grösse der zu übertragenden Kräfte. Manchmal wendet man auch sog. Spannrollen an, das sind Rollen, welche durch ihr eigenes oder durch die von ihnen vermittelte Wirkung eines andern Gewichtes oder auch irgend einer Kraft auf den einen, den führenden oder geführten, Riemtheil drücken und dadurch eine grössere Spannung hervorbringen.

§. 85. **Zahnräder oder Verzahnungen.** — Die Zahnräder sind wie der Riemen ohne Ende dazu bestimmt, die Bewegung von einer Welle auf eine andere zu übertragen; man wendet sie in dem Falle an, wo die beiden Wellen eine hinreichend kleine Entfernung von einander haben.

Um die Bewegung einer Welle einer andern, ihr parallelen und nahe an ihr gelegenen mitzutheilen, könnte man sich damit begnügen, an diese beiden Wellen zwei Rollen anzubringen, deren Oberflächen sich berühren (Fig. 121). Wenn diese beiden Rollen stark genug aneinander gedrückt wären, so würde dadurch zwischen ihren Oberflächen eine Reibung hervorgebracht werden, in Folge deren die eine der beiden Rollen sich nicht drehen könnte, ohne die andere mitzunehmen. Diese beiden Bewegungen würden im entgegengesetzten Sinn stattfinden, wie es die Pfeile der Fig. 121 andeuten. In der That wendet man in

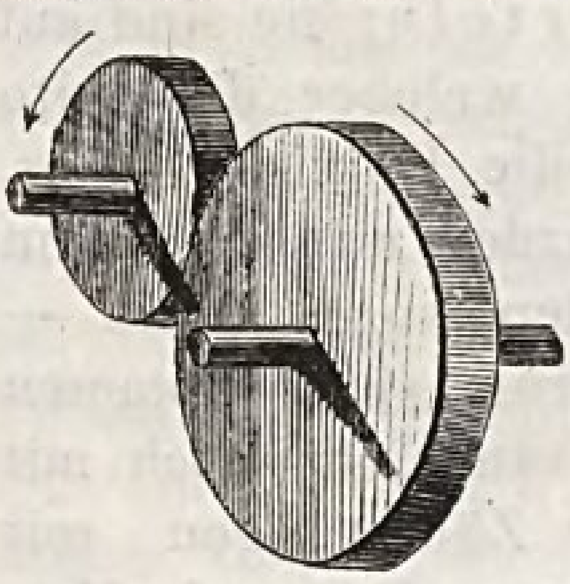


Fig. 121.

manchen Fällen solche Rollen, Friktionsrollen genannt, an und zwar namentlich da, wo durch unvermeidliche Stösse bei der Bewegungsübertragung zu fürchten wäre, dass die Zähne von Zahnrädern abgebrochen würden. Aber wenn die Welle, auf welche die Bewegung übertragen werden soll, einen grossen Widerstand zu überwinden hätte, so würde die Adhäsion nicht ausreichend sein, um sie herumzudrehen, und es würde sich nur eine der beiden Rollen drehen, indem sie an der andern gleiten würde.

Denken wir uns nun, dass, um der Adhäsion nachzuhelfen und zu bewirken, dass sich keine der beiden Rollen drehen kann, ohne die andere mitzunehmen, auf dem Umfang der beiden Rollen Erhöhungen und Vertiefungen angebracht werden, die ineinander eingreifen, so erhält man anstatt der Rollen die sogenannten Zahnräder, welche im Falle des Beispiels, das wir hier im Auge haben, wo die Wellen parallel sind, Stirnräder heissen. Die Bewegung überträgt sich dabei genau auf dieselbe Art, wie vorhin, aber es kann sich nun das eine der beiden Räder nicht umdrehen, ohne das andere mitzunehmen, vorausgesetzt, dass die Erhöhungen oder Zähne nicht abbrechen.

Die Zähne eines Zahnrades sind alle von gleicher Gestalt und regelmässig über den ganzen Umfang dieses Rades vertheilt. Wenn zwei Räder ineinander eingreifen sollen, so muss ein Zahn sammt dem Zwischenraum, der ihn von dem benachbarten trennt, die sog. Schrift, auf dem Umfange jedes der beiden Räder denselben Raum einnehmen, sodass also die Anzahl der Zähne des einen Rads zu der des andern in demselben Verhältniss steht, wie die Längen der Peripherien, also auch wie die Halbmesser der beiden Räder. Die Breite der Zähne, sowie die Grösse der Schrift selbst richten sich nach der Grösse der zu übertragenden Kraft. Je grösser diese wird, desto grösser müssen natürlich auch jene beiden Dimensionen sein. Ausserdem müssen, wenn der Eingriff der Räder ein richtiger und ruhiger sein soll, die Zähne eine bestimmte Gestalt erhalten, welche durch geometrische Betrachtungen gefunden werden kann. Ein Rad, das im Verhältniss zu dem, in welches es eingreift, klein ist, erhält gewöhnlich den Namen Trieb.

In Bezug auf die Wirkung der Kräfte verhalten sich die Zahnräder ganz so wie die Riemenrollen. Setzen wir voraus, die Kraft F (Fig. 122) sei an der Kurbel B angebracht, um die Welle A durch Vermittlung der Zahnräder C und D umzudrehen und dadurch P zu heben. Die Zähne des Rades C üben

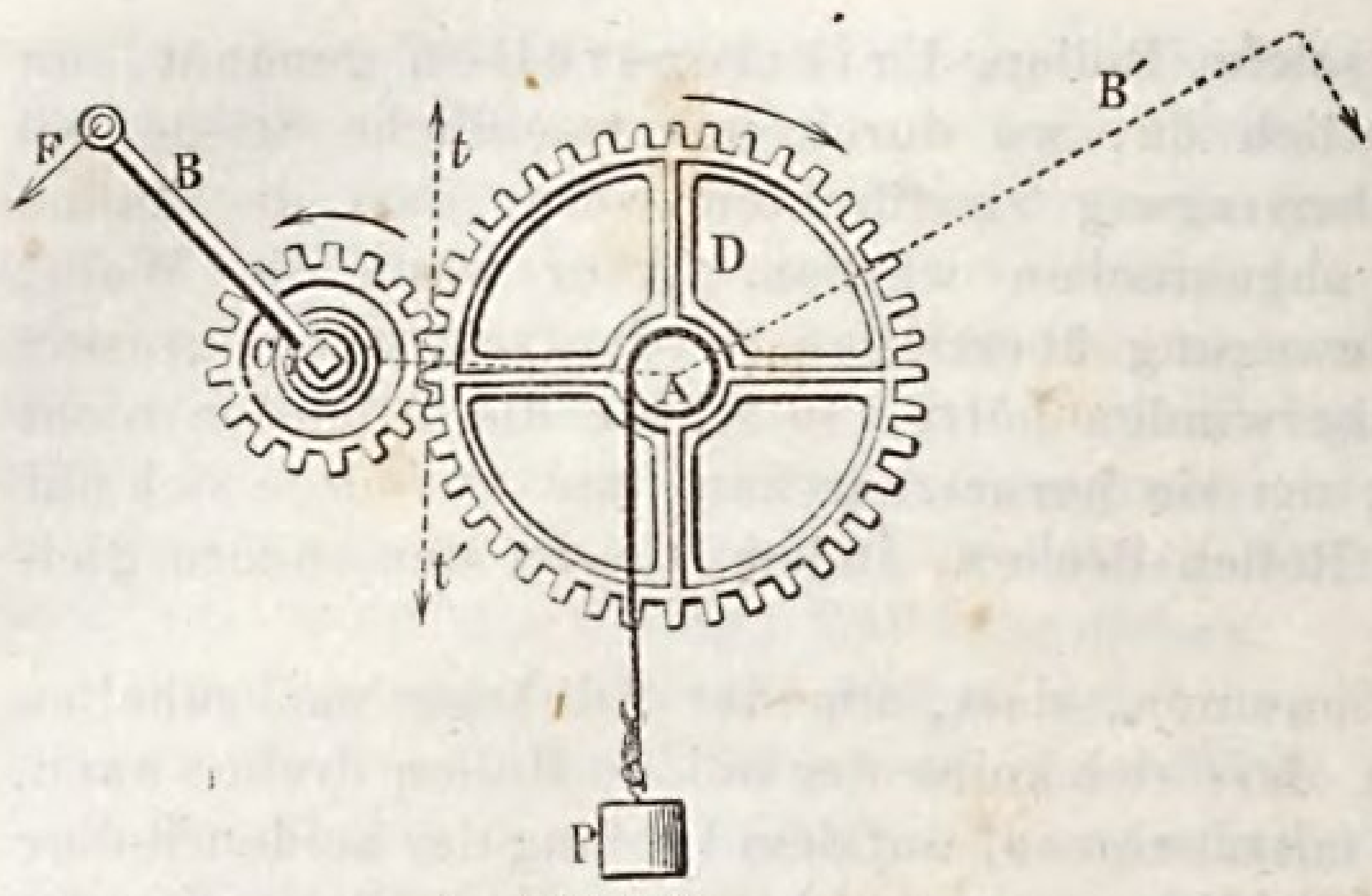


Fig. 122.

auf die des Rades D einen Druck t aus, welcher dem Gewichte P das Gleichgewicht hält; dieser Druck hat aber einen gleich grossen Gegendruck t' zur Folge, welcher von den Zähnen des Rades D auf die des Rades C ausgeübt wird und durch die Kraft F überwunden werden muss. Wenn der Halbmesser des Rades C dreimal so klein als der Arm der Kurbel B ist, so ist der Druck t' das dreifache der Kraft F; es wird also auch die Kraft t dreimal so gross als die Kraft F und kann, um das Gewicht P zu überwinden, durch eine Kraft ersetzt werden, die gleich F ist, aber auf eine Kurbel B' wirkt, deren Arm dreimal so lang als der Halbmesser des Rades D ist. Die Kraft F, welche auf die Kurbel B wirkt und das Gewicht P durch Vermittlung der Zahnräder hebt, muss folglich dieselbe Grösse haben, als wenn sie an der Kurbel B' angebracht wäre, welche direct an der Welle A befestigt ist. Bemerken wir ausserdem noch, dass das Verhältniss der Längen der Kurbeln B und B' dasselbe ist, wie das Verhältniss der Halbmesser der Räder C und D und folglich auch dasselbe, wie das Verhältniss der Zähnezahlen dieser Räder, so folgt daraus leicht, dass, wenn das Rad D zwei-, drei-, viermal so viel Zähne hat als das Rad C, die Kraft F ein zwei-, drei-, viermal so grosses Gewicht heben kann, als dasjenige ist, welches sie in die Höhe heben würde, wenn die Kurbel, an der sie wirkt, direct an der Welle A befestigt wäre. Die Fig. 123 zeigt die Einrichtung, welche man gewöhnlich den Winden mit Verzahnungen gibt, deren Theorie wir soeben auseinander gesetzt haben. In dieser Form heissen sie *Aufzugsmaschinen*, auch *Haspel mit Vorgelege*, und man bedient sich ihrer in sehr vielen Fällen; wir werden bald Gelegenheit erhalten, einige Beispiele ihrer Anwendung kennen zu lernen. Anstatt einer einzigen Kurbel sieht man deren zwei an den Enden einer und derselben Welle angebracht, damit, wo nöthig, zwei Männer zum Drehen an der Maschine verwendet werden können.

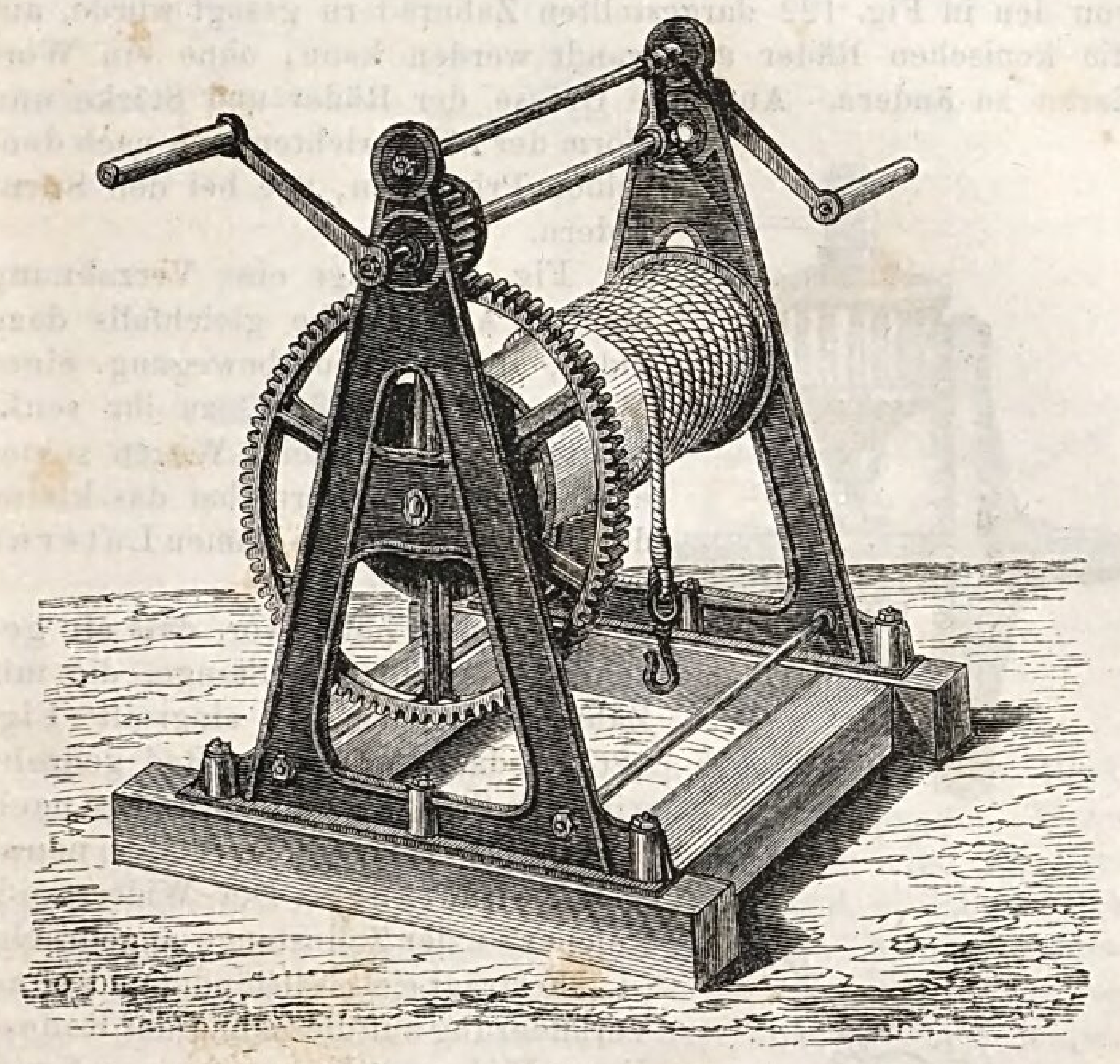


Fig. 123.

Die Uebertragung einer Rotationsbewegung von einer Welle auf eine andere, welche einen Winkel mit der ersteren bildet geschieht in ganz ähnlicher Weise mit Hilfe von sog. konischen Rädern, auch Winkel- oder Kegelräder genannt. Fig. 124 stellt zwei Räder dieser Art vor, welche dazu dienen, zwei Wellen mit einander zu verbinden, welche einen rechten Winkel unter sich bilden. Man sieht, dass ihre Kränze in Form einer Kegelfläche abgeschrägt sind, woher die obige Benennung kommt. In Bezug auf die Uebertragung der Kräfte bemerkt man leicht, dass alles das, was

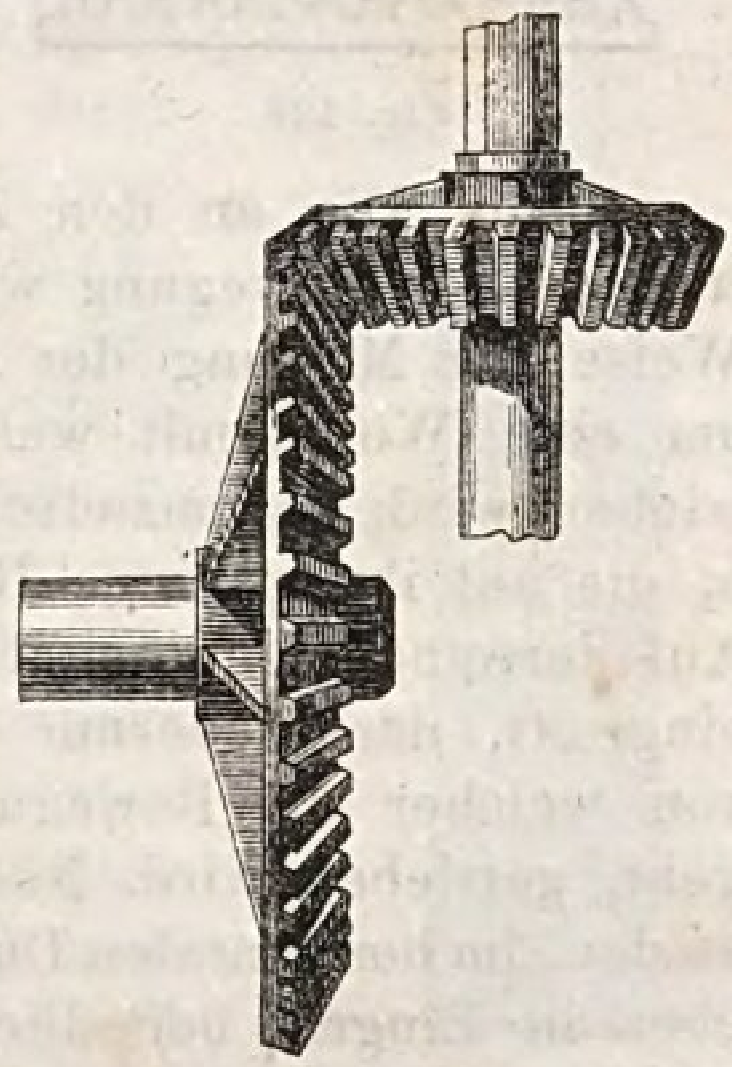


Fig. 124.

von den in Fig. 122 dargestellten Zahnrädern gesagt wurde, auf die konischen Räder angewandt werden kann, ohne ein Wort daran zu ändern. Auch die Grösse der Räder und Stärke und Form der Zähne richten sich nach denselben Principien, wie bei den Stirnrädern.

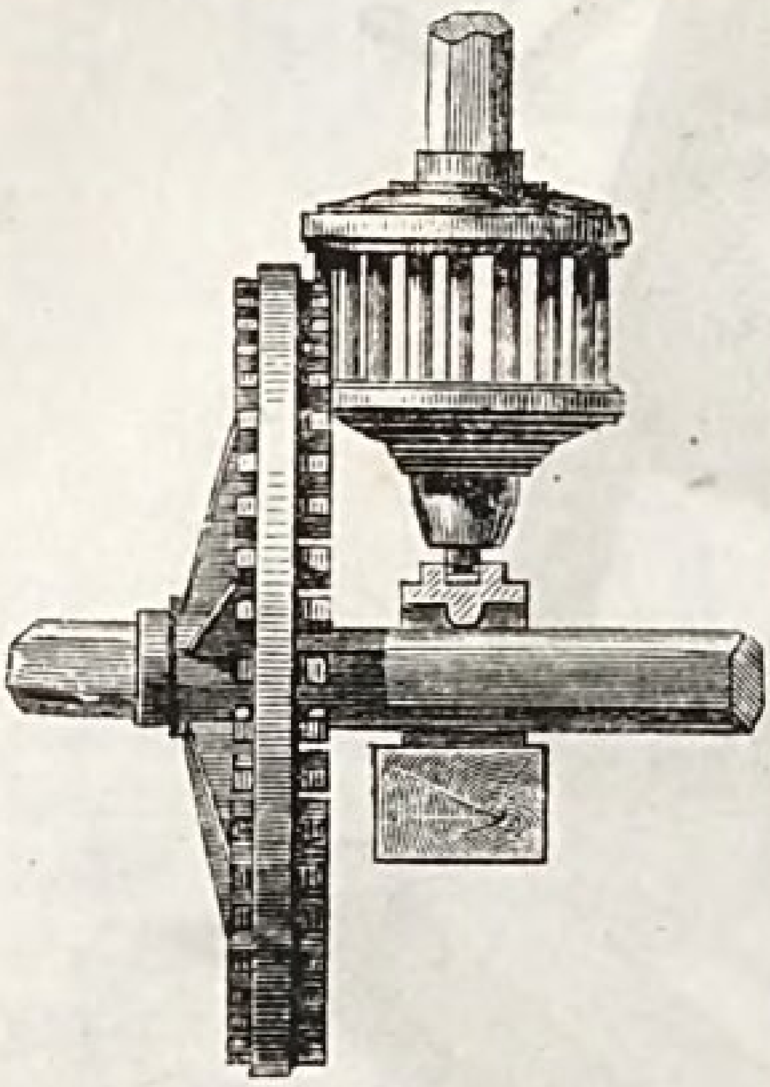


Fig. 125.

Fig. 125 zeigt eine Verzahnung anderer Art, welche gleichfalls dazu dient, die Rotationsbewegung einer Welle auf eine andere, zu ihr senkrechte, zu übertragen. Wegen seiner eigenthümlichen Form hat das kleine der beiden Räder den Namen Laterne erhalten.

Es kommt häufig vor, dass ein gezahntes Rad in eine Stange, die mit Zähnen versehen ist, eingreift (Fig. 126), sodass, wenn das Rad gedreht wird, die Stange sich ihrer Länge nach fortbewegt. Eine solche Stange nennt man Zahnstange. Der Widerstand, welcher an der Zahnstange angebracht ist, überträgt sich vollständig und ohne Veränderung auf die Zähne des Rades; dieser Widerstand muss also zur Kraft welche an einer Kurbel angreift, um das Rad zu drehen, im umgekehrten Verhältniss des Halbmessers des Rades zum Arm der Kurbel stehen.

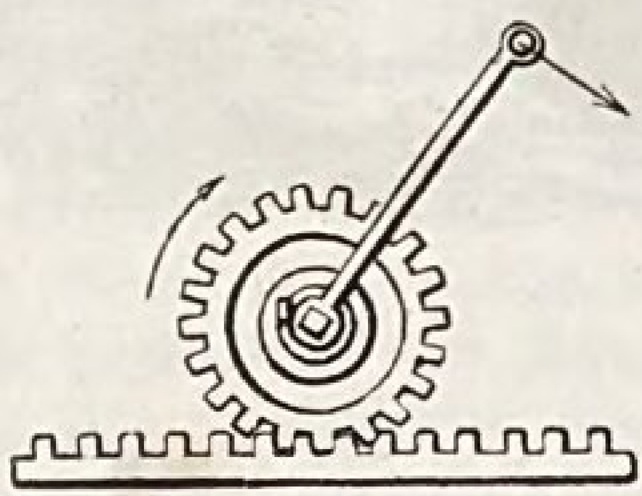


Fig. 126.

§. 86. Die an den Zähnen der Zahnräder bei der Uebertragung der Bewegung wirkende Kraft hat man in sinnreicher Weise zur Messung der Kraft benützt, welche nothwendig ist, um eine Welle, mit welcher irgend eine Arbeitsmaschine betrieben wird, herumzudrehen. Sei A (Fig. 127) diese Welle und a_1 die auf ihr sitzende Riemscheibe zum Betrieb der Maschine. Auf derselben Welle sitzt ein Zahnrad b_1, in welches das Trieb c eingreift, das wiederum von dem Zahnrad b an der Welle B, von welcher die Bewegung vermittelst der Riemscheibe a ausgeht, getrieben wird. Nach obigen Auseinandersetzungen wirken an den, im horizontalen Durchmesser einander gegenüberliegenden, eben in Eingriff befindlichen Zähnen des Triebes c zwei gleiche und parallele Kräfte q, welche sich zu einer Mittelkraft in der

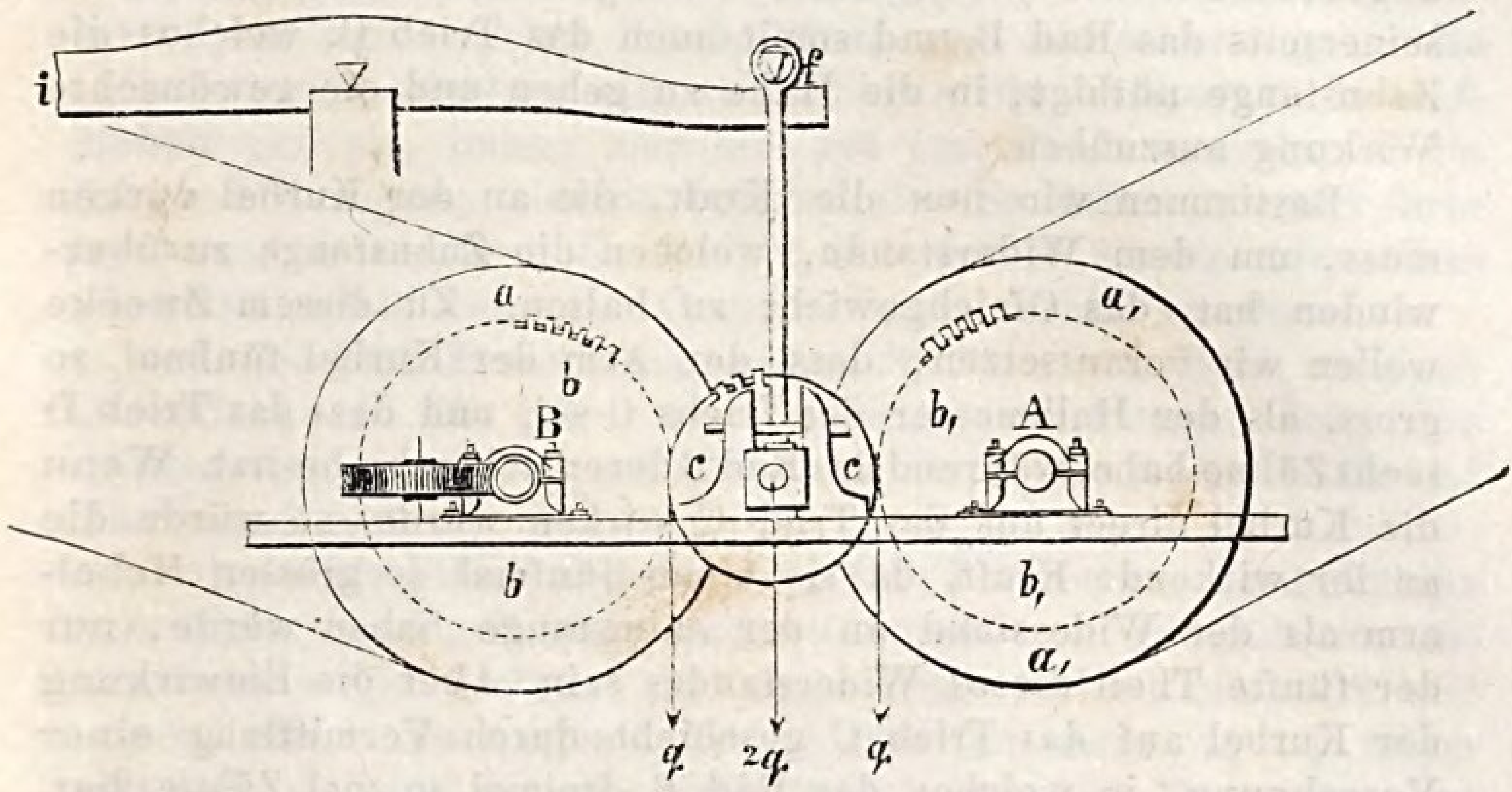


Fig. 127.

Achse dieses Triebes von der doppelten Grösse vereinigen. Diese Kraft stellt den Druck jener Achse gegen ihre Lager vor. Wenn diese Lager in vertikaler Richtung verschiebbar und an dem einen Arm eines Waagbalkens if aufgehängt sind, so kann durch Wiegen die Kraft q bestimmt werden. Der beschriebene Mechanismus heisst desshalb auch dynamometrische Schnellwaage; er rührt von *Hachette* her. *White* hat später statt der Stirn- Kegelräder angewandt, wodurch der ganze Apparat compendiöser und leichter transportabel wurde.

§. 87. **Die Wagenwinde.** — Als Beispiel für die Anwendung der Zahnräder, wo durch ihre Vermittlung eine bedeutende Kraft ausgeübt werden soll, nehmen wir die Wagenwinde (Fig. 128), welche dazu dient, sehr schwere Körper etwas in die Höhe zu heben.

Ein Trieb C greift in eine Zahnstange A. Auf der Achse dieses Triebs ist ein Zahnrad B befestigt, welches sich mit diesem zugleich herumdreht, und in welches ein zweites Trieb D eingreift; die Achse dieses zweiten Triebs endlich ist mit einer Kurbel E versehen. Das obere Ende der Zahnstange bringt man unter den zu hebenden Körper und dreht alsdann die Kurbel in dem durch den Pfeil

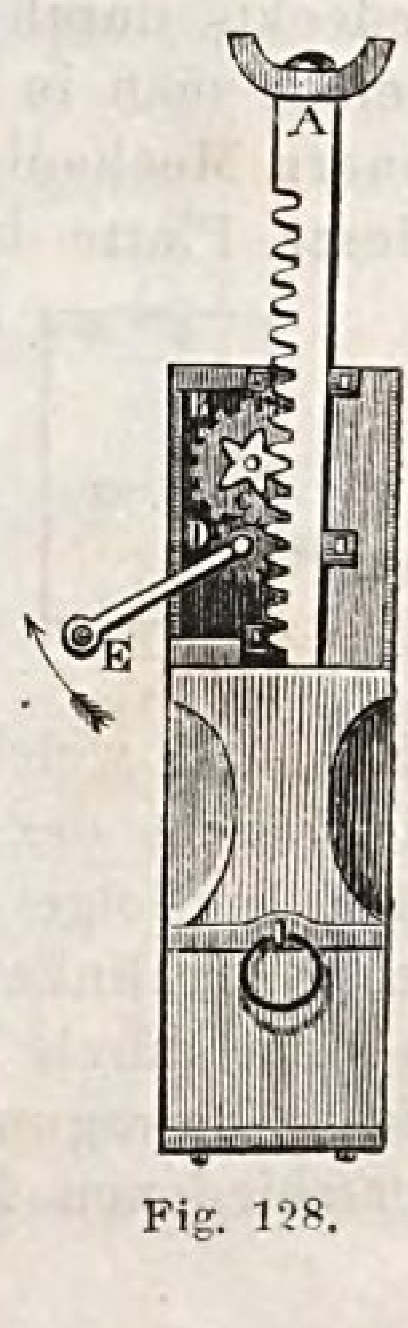


Fig. 128.

angedeuteten Sinn. Das Trieb D folgt der Kurbel, und dreht seinerseits das Rad B und somit auch das Trieb C, welches die Zahnstange nöthigt, in die Höhe zu gehen und die gewünschte Wirkung auszuüben.

Bestimmen wir nun die Kraft, die an der Kurbel wirken muss, um dem Widerstande, welchen die Zahnstange zu überwinden hat, das Gleichgewicht zu halten. Zu diesem Zwecke wollen wir voraussetzen, dass der Arm der Kurbel fünfmal so gross, als der Halbmesser des Triebs C sei, und dass das Trieb D sechs Zähne habe, während das Rad B deren achtzehn besitzt. Wenn die Kurbel direct auf das Trieb C wirken würde, so würde die an ihr wirkende Kraft, da sie einen fünfmal so grossen Hebelarm als der Widerstand an der Zahnstange haben würde, nur der fünfte Theil dieses Widerstandes sein. Aber die Einwirkung der Kurbel auf das Trieb C geschieht durch Vermittlung einer Verzahnung, in welcher das Rad B dreimal so viel Zähne hat, als das Trieb D; die an der Kurbel wirkende Kraft kann also dreimal so klein sein, als sie ohne jene Verzahnung sein würde; sie ist daher im Ganzen nur der fünfzehnte Theil des Widerstands, den die Zahnstange zu überwinden hat. Mittelst einer solchen Winde kann daher eine Kraft von 40 Kilogramm ein Gewicht von 600 Kilogramm heben.

Der Körper der Wagenwinde ist ein Stück Holz, in welchem ein Einschnitt angebracht ist, der dazu bestimmt ist, die Zahnräder aufzunehmen. Diese Räder sind mit einer eisernen Platte bedeckt, durch welche die Achse der Kurbel hindurchgeht, und welche man in Fig. 128 als abgehoben vorausgesetzt hat, um den innern Mechanismus sichtbar zu machen. An der äussern Fläche dieser Platte ist ein Gesperre (Fig. 129) angebracht, welches gestattet, mit der Einwirkung der Kraft, welche an der Kurbel dreht, inne zu halten, ohne dass die Zahnstange dem Einfluss des Gewichtes, welches sie trägt, nachgibt und in das Innere der Winde zurückkehrt, indem sie die Räder im entgegengesetzten Sinn dreht. Die Sperrklinke *m*, welche um den Punkt *o* drehbar ist, greift zwischen die Zähne des Sperrrades *n*, welches an der Kurbelachse festsitzt. In Folge der Form der Zähne des Sperrrads und der Lage der Sperrklinke kann sich, wie man leicht sieht, die Kurbel nur in dem durch den Pfeil bezeichneten Sinn drehen. Während dieser Bewegung wird die Sperrklinke nach und nach über die verschiedenen Zähne des Sperrrads hinweggehoben, fällt aber

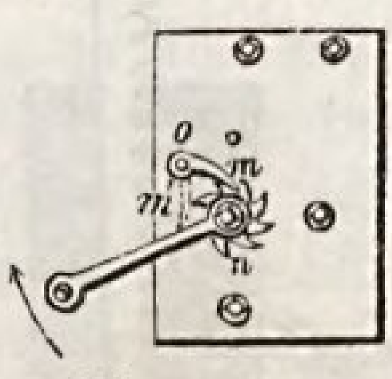


Fig. 129.

jedesmal, nachdem ein Zahn vorübergegangen ist, durch ihr Gewicht von selbst wieder herab. Wenn man die Zahnstange in die Winde zurückschieben will, so darf man nur die Sperrklinke aufheben und sie, indem man sie um den Punkt *o* dreht, in die Lage *m'* bringen; alsdann berührt sie die Zähne nur mit ihrer convexen Seite, und die Kurbel befindet sich unter denselben Umständen, als wenn das Gesperre nicht vorhanden wäre.

§. 88. **Der Hebebock.** — Um die bei einem Baue nöthigen Materialien in die Höhe zu schaffen, wendet man häufig den Hebebock an, der eine Verbindung des Haspels, der Rolle und manchmal auch der Zahnräder ist.

Der einfachste Hebebock (Fig. 130) besteht aus zwei Stützen von Holz, die durch eine gewisse Anzahl von Querhölzern miteinander verbunden sind und dazu dienen, einen Haspel T und eine Rolle P zu tragen. Er ist mit den untern Enden seiner Stützen einfach auf die Erde oder auf einen Fussboden von Dielen gesetzt, der in gewisser Höhe angebracht ist. Um ihn in der geeigneten Lage zu erhalten, welche er haben muss, wenn er in Thätigkeit gesetzt werden soll, befestigt man an seinem Ende C ein Seil CD, welches an einem Baume oder an einem Haus festgemacht ist. Der Körper, welcher in die Höhe gezogen werden soll, hängt an einem andern Seil, welches über den Hals der Rolle geht und sich auf dem Wellbaum des Haspels endigt, an dessen Oberfläche es befestigt ist. Der Haspel wird mit Hebeln gedreht, die in Löcher gesteckt werden, welche zu diesem Zweck angebracht sind; dadurch wickelt sich das Seil auf die Welle des Haspels auf, und der Körper steigt in die Höhe. Die Spannung des über die Rolle gehenden Seils ist offenbar gleich dem Gewicht des an ihm hängenden

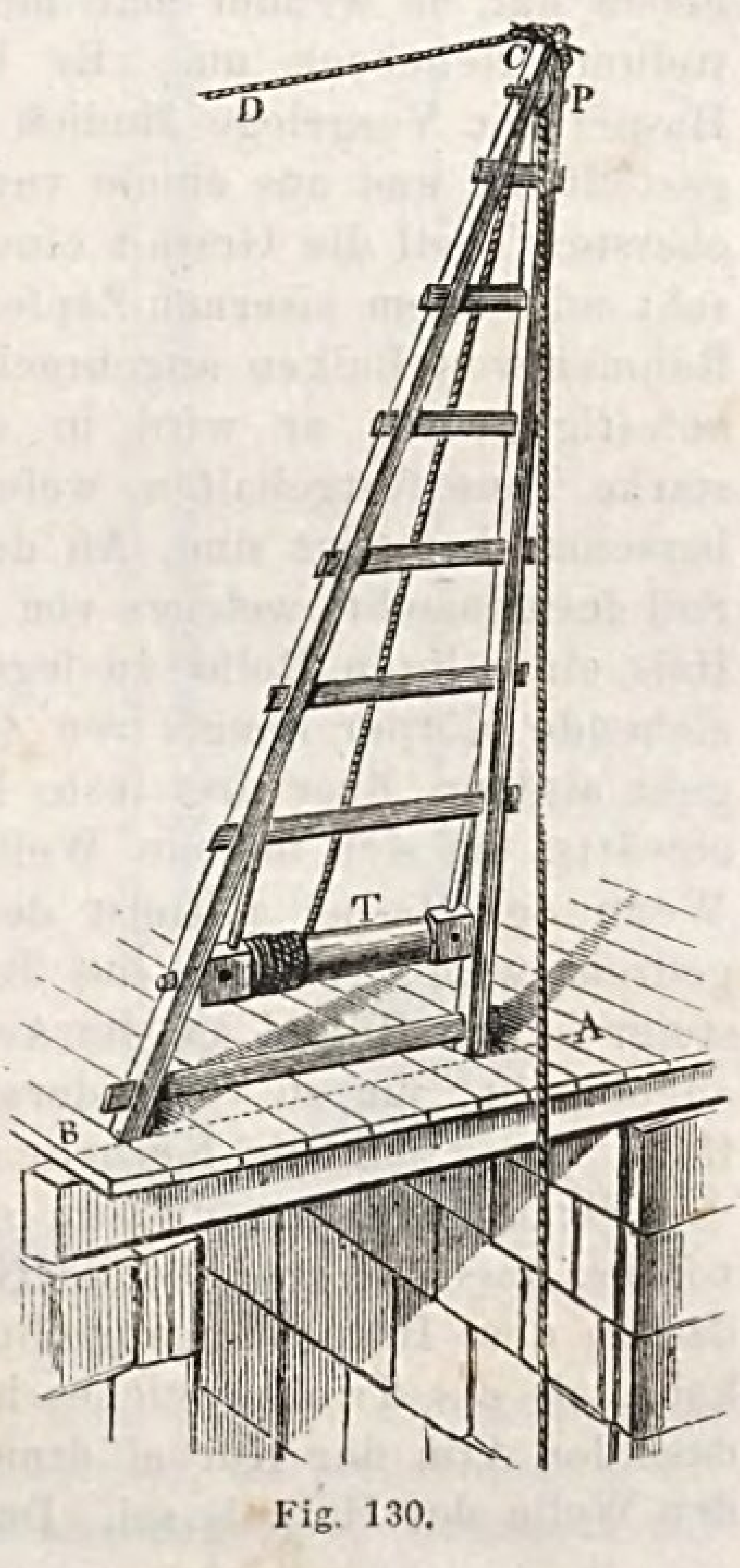


Fig. 130.

Körpers. Es ist also die zum Heben des Körpers erforderliche Kraft genau dieselbe, als wenn die Rolle nicht vorhanden und der Körper direct an dem Haspel aufgehängt wäre.

Die Spannung des Seiles CD, welches den Hebebock in seiner geneigten Lage erhält, kann durch folgende Betrachtung gefunden werden. Wenn dieses Seil durchschnitten würde, so würde der Bock fallen, indem er sich um die Linie AB drehen würde. Die Ursache dieser Bewegung, das Gewicht des zu hebenden Körpers, wird durch die Spannung des Seils CD im Gleichgewicht gehalten; diese beiden Kräfte können daher betrachtet werden, als wenn sie auf einen Hebel wirkten, dessen Arme die Entfernungen ihrer Richtungen von der Linie AB sind; sie müssen also in umgekehrtem Verhältniss dieser Entfernungen stehen. Man sieht daraus, dass die Spannung des Seiles CD um so geringer wird, je mehr sich der Hebebock der vertikalen Lage nähert.

Wenn man sehr schwere Körper auf eine grosse Höhe zu heben hat, so wendet man mit Vortheil den in Fig. 131 dargestellten Hebebock an. Er besteht aus einem transportablen Haspel mit Vorgelege ähnlich demjenigen, der in Fig. 123 dargestellt ist, und aus einem vertikal stehenden Mastbaum, dessen oberster Theil die Gestalt eines Kreuzes hat. Dieser Mastbaum ruht mit einem eisernen Zapfen in einer Pfanne, welche an dem Rahmen von Balken angebracht ist, auf welchem auch der Haspel befestigt wird; er wird in seiner vertikalen Lage durch vier starke Taue festgehalten, welche an fixen Punkten in der Nachbarschaft befestigt sind. An dem einen Arm des Kreuzes ist ein Seil festgemacht, welches von da abwärts geht, um sich um den Hals einer losen Rolle zu legen, an deren Scheere der aufzuziehende Körper hängt; von dieser steigt es wieder in die Höhe, geht alsdann über drei feste Rollen, und hierauf wieder nach abwärts, um sich um die Welle des Vorleghaspels zu schlingen. Wenn der Haspel mittelst der an ihm angebrachten Kurbeln gedreht wird, so wird das Tau aufgewickelt, und der Körper steigt in die Höhe. An der Achse der Kurbeln ist ein Gesperre angebracht, um zu verhindern, dass der Körper wieder herabfällt, wenn man die Kurbeln loslässt.

Setzen wir, um uns an ein bestimmtes Beispiel zu halten, voraus, dass das zu hebende Gewicht 1200^k betrage, ferner dass das an dem Haspel angebrachte Zahnrad zehnmal soviel Zähne habe, als das Trieb, welches in dasselbe eingreift, und endlich, dass der Arm der Kurbel dreimal so gross als der Halbmesser der Welle des Haspels sei. Da das Seil das Gewicht von 1200^k

mittelst einer losen Rolle trägt, von welcher sich die beiden Seiltheile in parallelen Richtungen entfernen, so muss es eine Spannung von 600^k haben. Diese Spannung erleidet durch die festen Rollen keine Aenderung, und der Haspel hat folglich einen Widerstand von 600^k zu überwinden. Wenn nun die Kurbel direct auf die Welle des Haspels wirken würde, so würde die an ihr aufzuwendende Kraft dreimal kleiner, also 200^k sein. Aber die Kurbel wirkt erst durch Vermittlung zweier Zahnräder, von denen das eine zehnmal so viel Zähne hat als das andere; die an ihr anzubringende Kraft ist also zehnmal kleiner, als sie es ohne diese Zahnräder sein würde; sie beträgt also nur 20^k. Beachten wir

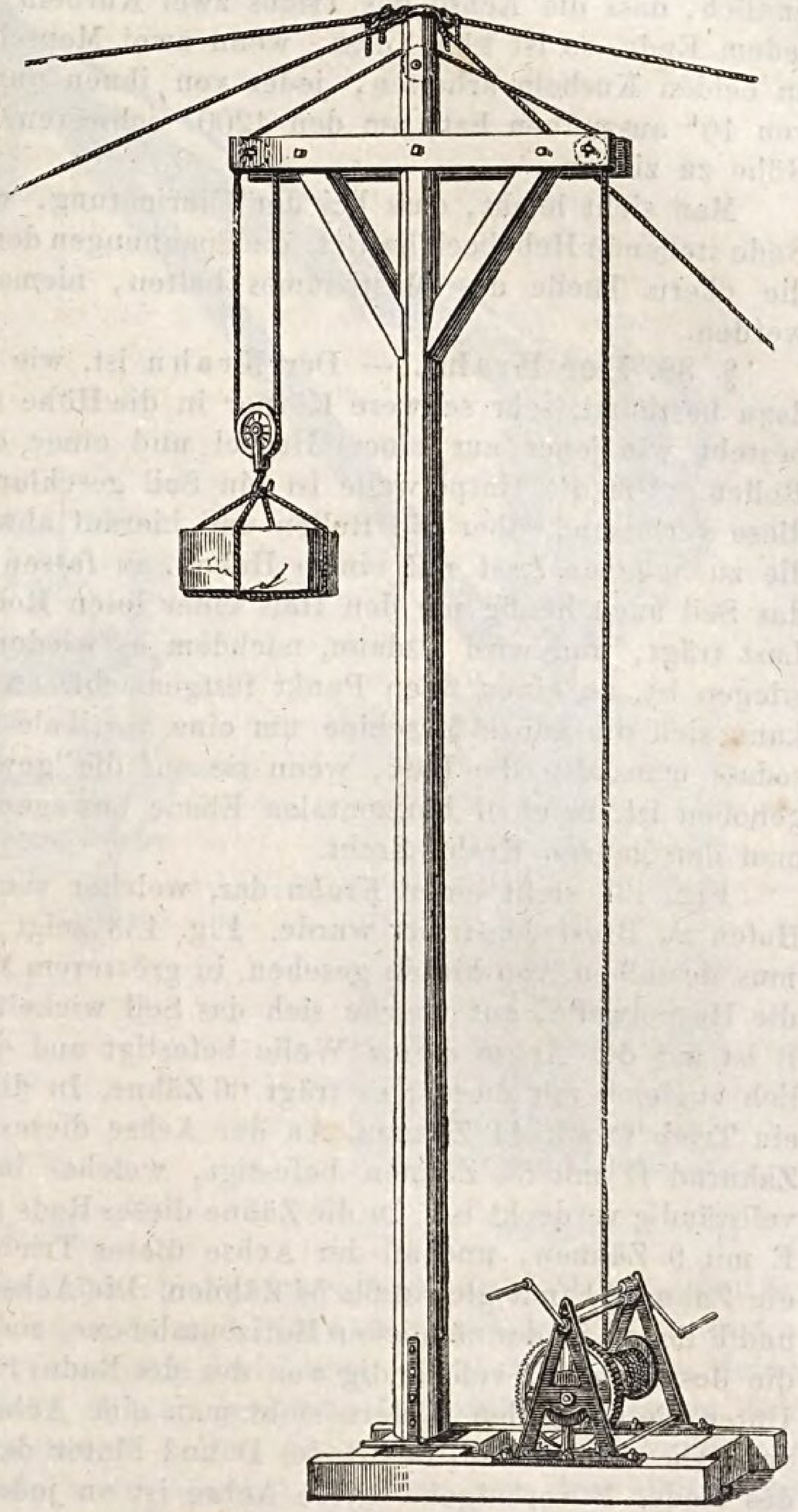


Fig. 131

endlich, dass die Achse des Triebs zwei Kurbeln trägt, eine an jedem Ende, so ist klar, dass, wenn zwei Menschen zusammen an beiden Kurbeln arbeiten, jeder von ihnen nur einen Druck von 10^k auszuüben hat, um den 1200^k schweren Körper in die Höhe zu ziehen.

Man sieht leicht, dass bei der Einrichtung, wie sie der in Rede stehende Hebebock besitzt, die Spannungen der Taue, welche die obern Theile des Mastbaumes halten, niemals sehr gross werden.

§. 89. **Der Krahn.** — Der Krahn ist, wie der Hebebock, dazu bestimmt, sehr schwere Körper in die Höhe zu ziehen und besteht wie jener aus einem Haspel und einer oder mehreren Rollen. Um die Haspelwelle ist ein Seil geschlungen, welches, diese verlassend, über die Rollen und hierauf abwärts geht, um die zu hebende Last mit einem Haken zu fassen; jedoch geht das Seil auch häufig um den Hals einer losen Rolle, welche die Last trägt, und wird alsdann, nachdem es wieder aufwärts gestiegen ist, an einen fixen Punkt festgemacht. Ausserdem aber kann sich die ganze Maschine um eine vertikale Achse drehen, sodass man also die Last, wenn sie auf die gewünschte Höhe gehoben ist, in einer horizontalen Ebene bewegen kann, indem man den ganzen Krahn dreht.

Fig. 132 stellt einen Krahn dar, welcher von *Cavé* für den Hafen zu Brest construirt wurde. Fig. 133 zeigt den Mechanismus desselben, von hinten gesehen, in grösserem Maassstab. A ist die Haspelwelle, auf welche sich das Seil wickelt; das Zahnrad B ist auf der Achse dieser Welle befestigt und dreht sich folglich zugleich mit dieser; es trägt 66 Zähne. In dieses Rad greift ein Trieb C mit 11 Zähnen. An der Achse dieses Triebs ist das Zahnrad D mit 54 Zähnen befestigt, welches in Fig. 132 fast vollständig verdeckt ist. In die Zähne dieses Rads greift das Trieb E mit 9 Zähnen, und an der Achse dieses Triebs endlich sitzt ein Zahnrad F mit gleichfalls 54 Zähnen. Die Achsen der Räder D und F liegen in der nämlichen Horizontalebene, sodass in Fig. 133 die des Rades D vollständig von der des Rades F verdeckt wird. Unter diesen beiden Rädern sieht man eine Achse GH, welche vor dem untern Theil des Rades D und hinter dem untern Theil des Rades F vorbeigeht. Diese Achse ist an jedem ihrer beiden Enden mit einer Kurbel versehen und trägt zwei Triebe K und L, jedes mit 9 Zähnen, welche in der in der Figur dargestellten Lage in keines der beiden Räder D und F eingreifen. Wenn man aber die Achse GH in der Richtung ihrer eigenen Länge

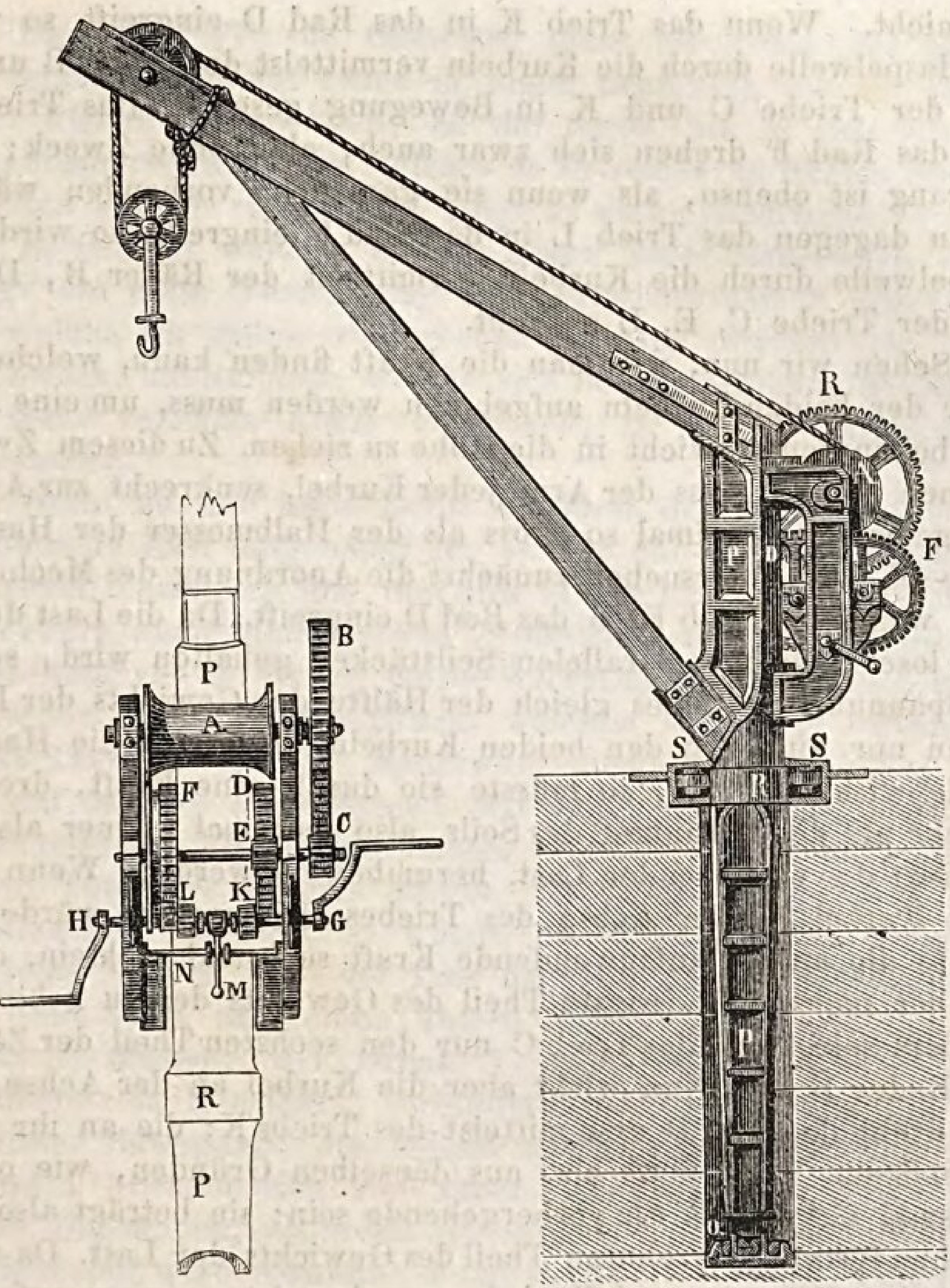


Fig. 133. Fig. 132. (Maassstab 1 : 100.)

gegen die rechte Seite schiebt, so greift das Trieb K in das Rad D, schiebt man sie dagegen nach links, so greift das Trieb L in das Rad F. In jeder von diesen drei Lagen ist sie durch einen Hebel M mit Gegenwicht, Falle genannt, festgehalten, welcher sich um die kleine Achse N drehen kann, und dessen hakenförmig gekrümmtes Ende sich jedesmal in einen von drei Halsringen legt, welche auf der Achse GH angebracht sind. In der in den Figuren abgebildeten Lage tragen die Triebe K und L, wenn die beiden Kurbeln gedreht werden, ihre Bewegung auf keines der Räder D oder F über, und die Haspelwelle dreht sich also

gar nicht. Wenn das Trieb K in das Rad D eingreift, so wird die Haspelwelle durch die Kurbeln vermittelst der Räder B und D und der Triebe C und K in Bewegung gesetzt. Das Trieb E und das Rad F drehen sich zwar auch, aber ohne Zweck; der Vorgang ist ebenso, als wenn sie gar nicht vorhanden wären. Wenn dagegen das Trieb L in das Rad F eingreift, so wird die Haspelwelle durch die Kurbeln vermittelst der Räder B, D, F und der Triebe C, E, L gedreht.

Sehen wir nun, wie man die Kraft finden kann, welche an jeder der beiden Kurbeln aufgeboten werden muss, um eine Last von bekanntem Gewicht in die Höhe zu ziehen. Zu diesem Zweck nehmen wir an, dass der Arm jeder Kurbel, senkrecht zur Achse GH gemessen, dreimal so gross als der Halbmesser der Haspelwelle sei, und untersuchen zunächst die Anordnung des Mechanismus, wenn das Trieb K in das Rad D eingreift. Da die Last durch eine lose Rolle mit parallelen Seilstücken gehalten wird, so ist die Spannung des Seiles gleich der Hälfte des Gewichts der Last. Wenn nur eine von den beiden Kurbeln direct auf die Haspelwinde wirken würde, so müsste sie durch eine Kraft, dreimal kleiner als die Spannung des Seils, also sechsmal kleiner als das Gewicht der zu hebenden Last, herumbewegt werden. Wenn dieselbe Kurbel an der Achse des Triebes C angreifen würde, so müsste die an ihr aufzuwendende Kraft sechsmal so klein, d. h. also der sechsunddreissigste Theil des Gewichts des zu hebenden Körpers sein, weil das Trieb C nur den sechsten Theil der Zähne des Rades B hat. Nun wirkt aber die Kurbel an der Achse GH und dreht das Rad D erst mittelst des Triebs K; die an ihr aufzuwendende Kraft muss also aus denselben Gründen, wie oben, sechsmal kleiner als die vorhergehende sein; sie beträgt also den zweihundertundsechzehnten Theil des Gewichts der Last. Da aber die Achse GH mit zwei Kurbeln versehen ist, so muss auf jede blos eine Kraft wirken, die vierhundertzweiunddreissigmal kleiner als jenes Gewicht ist.

Man sieht leicht ein, dass bei der zweiten Anordnung, wo das Trieb L in das Rad F eingreift, die an jeder Kurbel aufzuwendende Kraft nur den sechsten Theil von derjenigen beträgt, welche bei der ersten Anordnung angewendet werden muss; sie ist also 2592mal so klein, als das Gewicht der Last. Man sieht daraus, dass mit einem solchen Krahn zwei Menschen eine enorme Last zu heben im Stande sind. Sie brauchen z. B. auf die Kurbeln nur einen Druck von ungefähr 10^k jederseits auszuüben, um eine Locomotive von 25000^k Gewicht in die Höhe zu heben.

Das Stück PP von Gusseisen dient als Achse der ganzen Maschine. Es endigt unten in einen Zapfen Q, welcher sich in einer Pfanne drehen kann; an der Stelle, wo es sich aus dem Grundmauerwerk, durch welches es in seiner vertikalen Stellung erhalten werden soll, erhebt, zeigt es eine cylindrische Verstärkung R, mittelst welcher es sich gegen jenes Mauerwerk stützt. Rings um diese Verstärkung sind Frictionsrollen S angebracht, auf welche wir später zu sprechen kommen werden; sie haben den Zweck, die Reibung, welche sich bei der Drehung des Krahns um seine vertikale Achse entwickelt, so viel als möglich zu vermindern.

Wenn an der losen Rolle am Ende des Krahns eine sehr bedeutende Last aufgehängt ist, so hat die ganze Maschine das Bestreben umzufallen und thut dies in der That, wenn das Grundmauerwerk nicht hinlänglichen Widerstand bietet. Um uns eine Vorstellung von der Grösse dieses Widerstandes zu machen, wollen wir sehen, wie man den Druck, welchen das Stück PP mittelst seines Theils R auf das Mauerwerk ausübt, finden kann, oder, was auf dasselbe hinauskommt, wir wollen den gleichen und entgegengesetzten Druck bestimmen, welchen das Mauerwerk auf diesen Theil des Krahns ausübt. Wenn das Mauerwerk nicht hinreichend fest wäre, so würde der Krahn der Wirkung des Gewichts X (Fig. 134) der Last nachgeben; er würde umfallen und sich dabei um seinen untern Endpunkt Q drehen; der Druck Y aber, welchen er in R erfährt, verhindert ihn an dieser Bewegung; die beiden Kräfte X und Y befinden sich also unter denselben Umständen, als wenn sie an dem Winkelhebel aQb wirkten. Folglich ist das Verhältniss des Drucks Y zu dem Gewicht X der Last dasselbe, wie das Verhältniss von Qa zu Qb. Wenn daher Qa zum Beispiel ein- und einhalbmal so gross als Qb ist, so ist der Druck Y ein- und einhalbmal so gross als das Gewicht der Last.

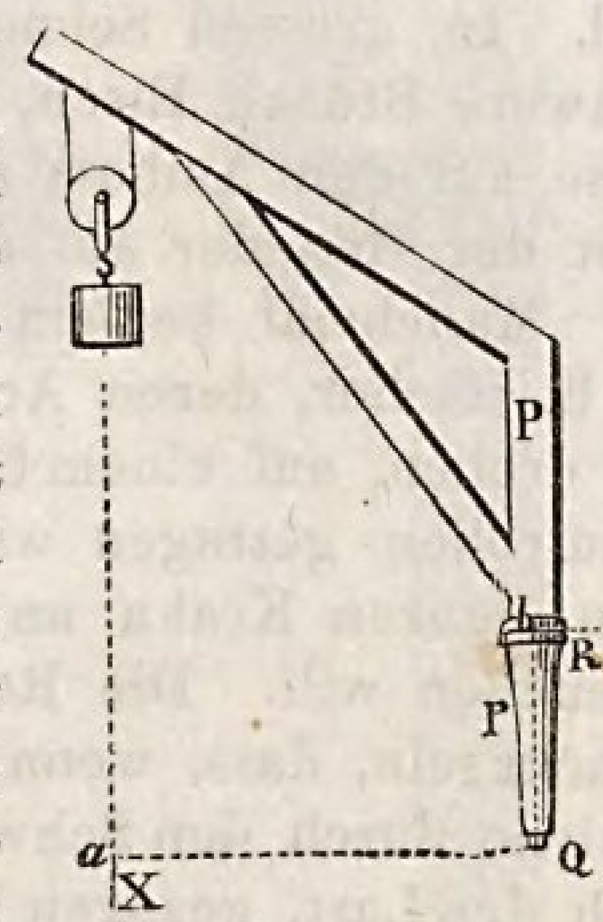


Fig. 134.

Die Krahne werden hauptsächlich zum Ausladen der Schiffe angewandt. Die Maschine wird zunächst in eine solche Stellung gebracht, dass sich die bewegliche Rolle an ihrem Ende gerade über dem Schiffe befindet; nachdem man hierauf die Rolle niedergelassen hat, wodurch sich das auf der Haspelwelle aufgewundene

Seil abwickeln musste, wird die Last, welche gehoben werden soll, an dem Haken befestigt, in welchen sich die Scheere der Rolle endigt. Alsdann dreht man an den Kurbeln, wodurch sich das Seil von Neuem aufwickelt und die Last emporgehoben wird. Wenn diese hierdurch eine genügende Höhe erreicht hat, dreht man den Krahn um seine vertikale Achse, bis die an ihm hängende Last direct über der Stelle steht, wo sie niedergelegt werden soll; endlich überlässt man die Haspelwelle der Bewegung, welche ihr die Spannung des Seils zu geben sucht; dadurch sinkt die Last herab, und nachdem sie auf dem Boden oder auf einem Wagen, welcher zu ihrem Weitertransport dient, hinreichende Unterstützung gefunden hat, lässt man sie von dem Haken los, um dieselbe Operation mit einem andern Stück der Ladung zu wiederholen.

Eine häufige Anwendung finden die Krahne auch noch in Werkstätten, wo sehr schwere Körper bewegt werden sollen, namentlich in Maschinenfabriken und in Giessereien. Zu diesem Zweck sind dann gewöhnlich mehrere Krahne in der Werkstätte aufgestellt, welche nacheinander in Thätigkeit gesetzt werden, wenn ein schweres Stück zu transportiren ist. Ein erster Krahn ergreift das Stück und führt es in die Nachbarschaft eines zweiten, welcher es nun seinerseits erfasst, um es weiter zu transportiren u. s. f., bis es sich an dem Ort befindet, wohin es geschafft werden soll. In grossen Schmieden bedient man sich der Krahne, um schwere Stücke Eisen, die geschmiedet werden sollen, von der Esse auf den Amboss zu schaffen und sie während der Thätigkeit der Hämmer auf demselben festzuhalten.

Manchmal bedient man sich auch transportabler Krahnen, d. h. solcher, deren Achse, anstatt sich in dem Grundmauerwerk zu drehen, auf einem Gestell von Holz oder Eisen steht, das von Laufrollen getragen wird. Durch diese Einrichtung kann man den ganzen Krahn an den Ort transportiren, wo man ihn gebrauchen will. Die Rollen müssen unter dem Gestell so angebracht sein, dass, wenn der Krahn in Thätigkeit ist, die Vertikale, welche durch den Schwerpunkt der ganzen Maschine, einschliesslich der Last, gezogen wird, durch das Innere des Polygons geht, das die Berührungspunkte der Räder mit dem Boden bilden (§. 64). Die Fig. 135 zeigt einen Krahn dieser Art. Der untere Theil bildet eine Art Wagen, welcher in seiner Mitte ein starkes, vertikal stehendes Stück Holz AA trägt, das als Achse des Krahns dient. Dasselbe erhebt sich bis zur Hälfte der ganzen Höhe des Krahns; es ist hohl und durch seine Höhlung geht der untere

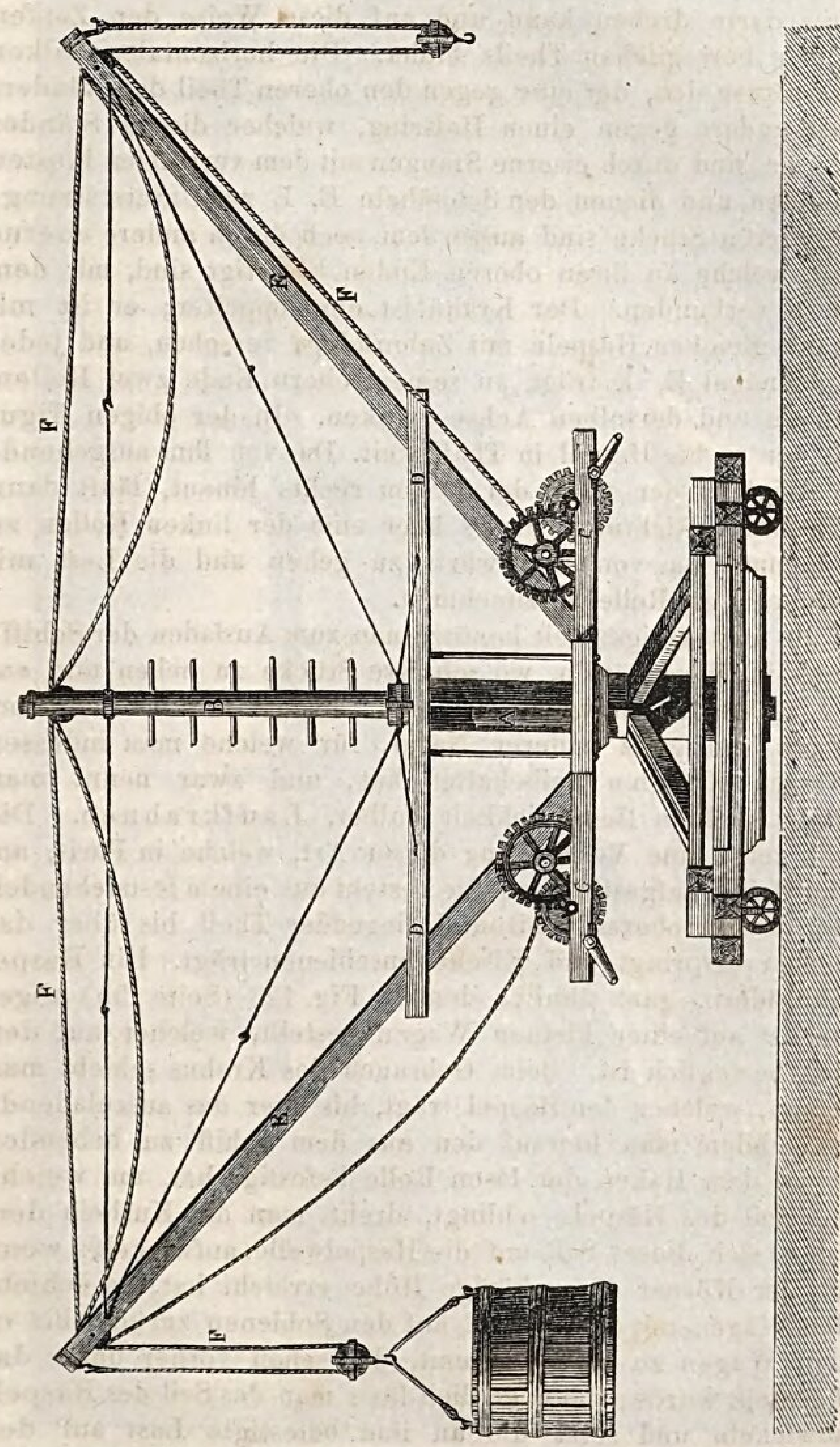


Fig. 135. (Maassstab 7 : 1000.)

Theil des vertikal stehenden cylindrischen Pfostens B, sodass er sich frei darin drehen kann und auf diese Weise den Zapfen des ganzen beweglichen Theils bildet. Die horizontalen Balken CC, DD stützen sich, der eine gegen den oberen Theil des Ständers AA, der andere gegen einen Halsring, welcher diesen Ständer umgibt; sie sind durch eiserne Stangen mit dem vertikalen Pfosten B verbunden und dienen den Schnäbeln E, E zur Unterstützung; diese letzteren Stücke sind ausserdem noch durch andere eiserne Stangen, welche an ihren oberen Enden befestigt sind, mit dem Pfosten B verbunden. Der Krahn ist ein doppelter; er ist mit zwei ganz gleichen Haspeln mit Zahnrädern versehen, und jeder seiner Schnäbel E, E trägt an seinem obern Ende zwei Rollen, die auf ein und derselben Achse stecken. In der obigen Figur ist blos der rechte Haspel in Thätigkeit. Das von ihm ausgehende Seil F steigt zu der einen der Rollen rechts hinauf, läuft dann in horizontaler Richtung, bis es über eine der linken Rollen zu liegen kommt, um von da abwärts zu gehen und die Last mit Hilfe einer losen Rolle aufzunehmen.

§. 90. Seit einiger Zeit benützt man zum Ausladen der Schiffe und auch in Werkstätten, wo schwere Stücke zu heben und auf kurze Strecken zu transportiren sind, anstatt der Krahne Vorrichtungen von ganz anderer Natur, für welche man indessen den Namen Krahn beibehalten hat, und zwar nennt man sie, ihrer leichten Beweglichkeit halber, Laufkrahnen. Die Fig. 136 zeigt eine Vorrichtung dieser Art, welche in Paris, am Ufer der Seine, aufgestellt ist. Sie besteht aus einem feststehenden Gerüste, dessen oberer horizontal liegender Theil bis über das Wasser hervorspringt und Eisenbahnschienen trägt. Ein Haspel mit Zahnrädern, ganz ähnlich dem in Fig. 123 (Seite 155) abgebildeten, ist auf einen kleinen Wagen gestellt, welcher auf den Schienen beweglich ist. Beim Gebrauch des Krahns schiebt man den Wagen, welcher den Haspel trägt, bis über das auszuladende Schiff; nachdem man hierauf den aus dem Schiff zu hebenden Körper an dem Haken der losen Rolle befestigt hat, um welche sich das Seil des Haspels schlingt, dreht man die Kurbeln derartig, dass sich dieses Seil auf die Haspelwelle aufwickelt; wenn dadurch der Körper die gehörige Höhe erreicht hat, so schiebt man den Wagen mit dem Haspel auf den Schienen zurück, bis er über den Wagen zu stehen kommt, der schon vorher unter das Gerüst gestellt wurde; dann endlich lässt man das Seil des Haspels sich abwickeln und setzt die an ihm befestigte Last auf den Wagen nieder.

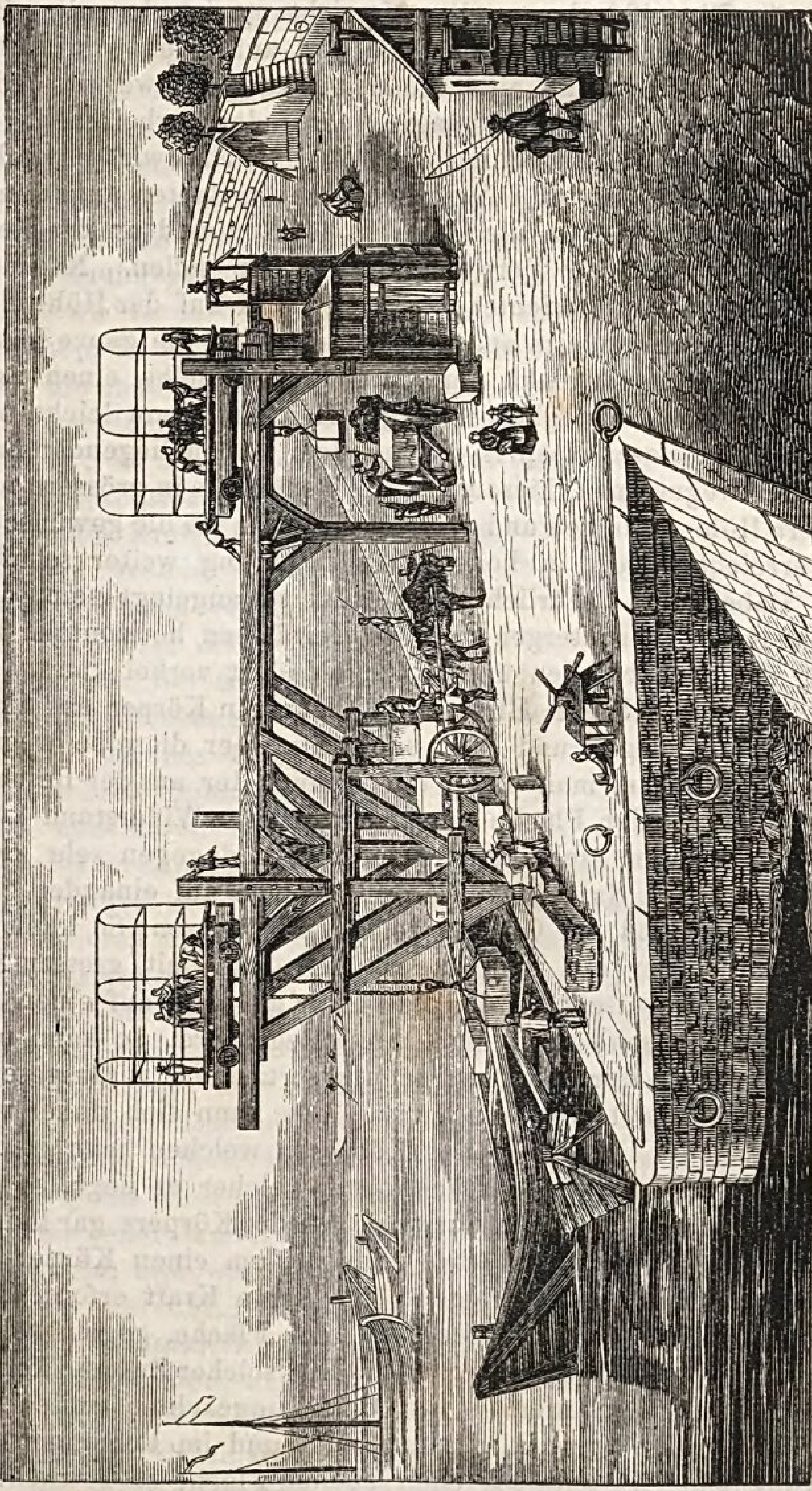


Fig. 136.

Die in Fig. 136 dargestellte Vorrichtung ist doppelt. Das Gerüst ist mit zwei Geleisen belegt, und auf jedem von diesen kann sich ein Wagen mit einer Aufzugsmaschine bewegen. Jeder der beiden Theile kann unabhängig vom andern arbeiten.

Eine ähnliche Einrichtung wie die, welche wir eben beschrieben haben, wird oft bei etwas grösseren Bauten angewandt, um die Baumaterialien in die Höhe zu fördern und an die Stelle zu schaffen, wo sie zur Verwendung kommen sollen. Nachdem ein festes Gerüste aufgerichtet ist, bringt man auf der Höhe desselben ein Schienengeleise an, welches sich über die ganze Länge des Arbeitsplatzes erstreckt, und stellt auf dasselbe einen Rollwagen, der einen Vorleghaspel trägt. Man sieht nun leicht, wie man mit Hilfe dieses Haspels die auf dem Boden liegenden Baumaterialien wegnehmen, hierauf je nach Bedürfniss in grössere oder geringere Höhe aufziehen und endlich, nachdem sie die gewünschte Höhe erreicht haben, in horizontaler Richtung weiter schaffen kann. Dabei muss natürlich das Gerüst so angelegt sein, dass das vom Haspel heruntergehende Seil bei dessen horizontaler Bewegung auf den Schienen überall ungehindert vorbei kann.

§. 91. **Die schiefe Ebene.** — Wenn ein Körper auf einer ebenen Fläche liegt, und man sucht ihn über dieselbe wegzuschieben, so erfährt man einen Widerstand, der aus der Reibung des Körpers auf der Fläche entspringt. Dieser Widerstand kann in manchen Fällen sehr gross, in andern dagegen sehr klein sein, je nach der Natur der Flächen, welche auf einander gleiten, und dem Grad der Glätte, welche sie besitzen. So kann ein grosser Stein, der auf dem Boden liegt, nur mit grosser Anstrengung fortgerutscht werden; wenn er dagegen auf einen mit glatten Eisen beschlagenen Schlitten gelegt wird, so kann man diesen schon mit geringer Anstrengung fortziehen, vorausgesetzt, dass der Boden mit Eis bedeckt ist. Man kann sich daher vorstellen, dass die Oberfläche des Körpers, welchen man gleiten lassen will, und die ebene Fläche, auf welcher er liegt, so gut polirt seien, dass man beim Fortschleifen des Körpers gar keinen Widerstand erfährt. Dann wäre offenbar, um einen Körper auf horizontaler Bahn fortzubewegen, gar keine Kraft erforderlich, da sein Gewicht von dem Widerstand der Fläche, gegen welche es senkrecht wirkt, aufgehoben wird. Ein solcher Zustand kommt zwar in Wirklichkeit niemals vor, dessenungeachtet wollen wir voraussetzen, dass er wirklich stattfinde, und im Folgenden die Bewegung eines Körpers auf einer ebenen Fläche so betrachten, als könne sie stattfinden, ohne den geringsten Widerstand durch

die Reibung zu erfahren. Wir haben schon früher einige ähnliche Voraussetzungen stillschweigend gemacht, als wir von den Rollen und Flaschenzügen, von den Haspeln, von den Zahnrädern u. s. w. sprachen; bei keiner dieser verschiedenen Maschinen haben wir die Widerstände, welche durch die Reibung der verschiedenen Stücke aneinander und namentlich der Zapfen an den innern Flächen der Lager, in welchen sie sich drehen, in Rechnung gezogen. Wir werden auf diese Widerstände, von denen wir vorderhand noch absehen, später zurückkommen, um zu sehen, in welcher Weise sie von Einfluss auf die Resultate sind, die man erhält, wenn man sie vernachlässigt.

Um einen schweren Körper (Fig. 137), welcher auf einer schiefen, d. h. gegen den Horizont geneigten Ebene liegt, im Gleichgewicht zu halten, kann man eine Kraft Q an ihn anbringen, welche parallel zur schiefen Ebene wirkt. Suchen wir die Grösse dieser Kraft zu bestimmen: Der Körper unterliegt der Wirkung seines Gewichts, welches man sich in seinem Schwerpunkt G angreifend und durch die vertikale Linie GD dargestellt denken kann.

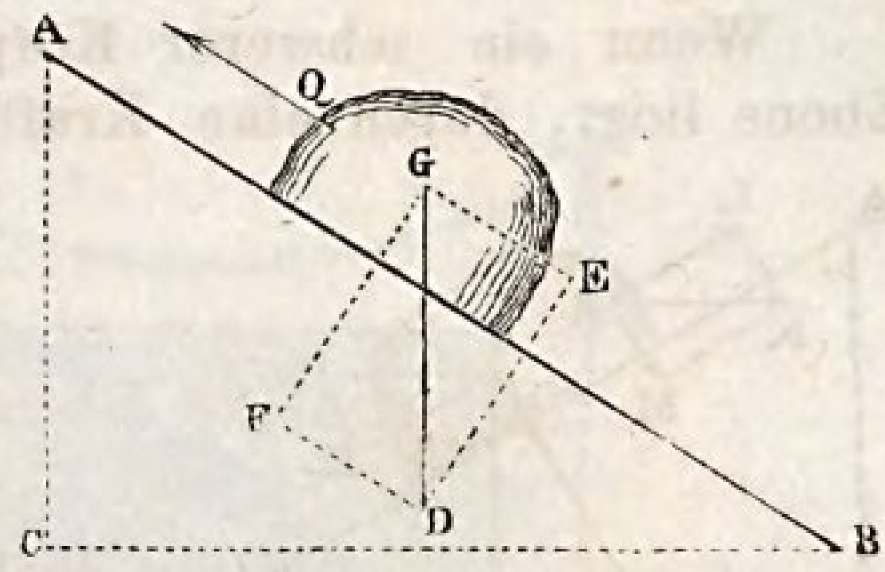


Fig. 137.

Dieses Gewicht kann in zwei Kräfte zerlegt werden, von denen die eine GE parallel zur schiefen Ebene, die andere GF senkrecht darauf ist. Die eine Seitenkraft GF drückt den Körper an die schiefe Ebene an, aber sie hat kein Bestreben, ihn über diese weggleiten zu machen, weder nach der einen, noch nach der andern Seite hin; ihre Wirkung wird durch die Festigkeit der schiefen Ebene aufgehoben. Die andere Seitenkraft GE dagegen sucht den Körper die schiefe Ebene herabzubewegen, und damit ihr die Kraft Q das Gleichgewicht hält, muss diese gleich und entgegengesetzt jener letzteren Seitenkraft sein. In der That sieht man leicht ein, dass wenn die Kraft Q nur einen Theil der Kraft GE aufhebt, der übrig bleibende Theil, wie klein er auch sei, den Körper veranlassen wird, die schiefe Ebene herabzugleiten, da wir voraussetzen, dass kein Reibungswiderstand stattfindet.

Nun erhält man, wenn man die Vertikale AC und die Horizontale BC zieht, ein rechtwinkliges Dreieck ABC, welches dem rechtwinkligen Dreieck DEG ähnlich ist; denn ausser den rechten Winkeln haben diese beiden Dreiecke auch noch die Winkel CAB

und DGE, deren Schenkel parallel und in dem nämlichen Sinne gerichtet sind, gleich. Das Verhältniss von GE zu GD ist also gleich dem Verhältniss von AC zu AB, und wenn man AC die Höhe und AB die Länge der schiefen Ebene nennt, so kann man den folgenden Satz aussprechen: Eine parallel zur schiefen Ebene wirkende Kraft Q hält einem auf derselben liegenden Körper das Gleichgewicht, wenn sie sich zum Gewicht dieses Körpers verhält, wie die Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Länge. Wenn die Höhe AC der vierte, fünfte, sechste Theil der Länge AB ist, so ist die Kraft Q der vierte, fünfte, sechste Theil des Gewichts des Körpers. — Der Druck GF (gleich ED), welchen der Körper senkrecht zur schiefen Ebene ausübt, verhält sich offenbar zum Gewicht des Körpers wie die Basis BC der schiefen Ebene zu ihrer Länge.

Wenn ein schwerer Körper, welcher auf einer schiefen Ebene liegt, durch eine Kraft HK (Fig. 138), welche in horizontaler Richtung wirkt, im Gleichgewicht gehalten werden soll, so kann dieselbe selbst wieder in zwei Seitenkräfte HL und HM zerlegt werden, von denen die erstere parallel, die letztere senkrecht zur schiefen Ebene wirkt. Die Seitenkraft HM kann den Körper weder nach der einen noch nach der andern Seite hin bewegen; sie wird durch die Festigkeit der schiefen Ebene aufgehoben. Die andere Seitenkraft HL dagegen sucht den Körper die schiefe Ebene hinaufzubewegen, und wenn daher die Kraft HK den Körper im Gleichgewicht halten soll, so muss die Seitenkraft HL der Seitenkraft GE des Gewichts des Körpers, welche ganz so wie in der vorigen Figur erhalten wird, das Gleichgewicht halten, d. h. es muss HL gleich und direct entgegengesetzt der Kraft GE sein. Zieht man nun GN horizontal durch G, bis die Verlängerung von DE in N getroffen wird, so sieht man leicht ein, dass das rechtwinklige Dreieck GEN dem rechtwinkligen Dreieck HLK congruent ist; denn ausser dem rechten Winkel und den Seiten LH und GE haben diese beiden Dreiecke auch noch die Winkel EGN und LHK gleich, deren Schenkel parallel und beide im entgegengesetzten Sinn gerichtet sind. Es ist folglich die Seite HK gleich der Seite GN; da ferner, wie leicht zu erweisen ist, das Dreieck GDN dem Dreieck ABC ähnlich ist, so ist das Verhältniss von GN zu GD dasselbe wie

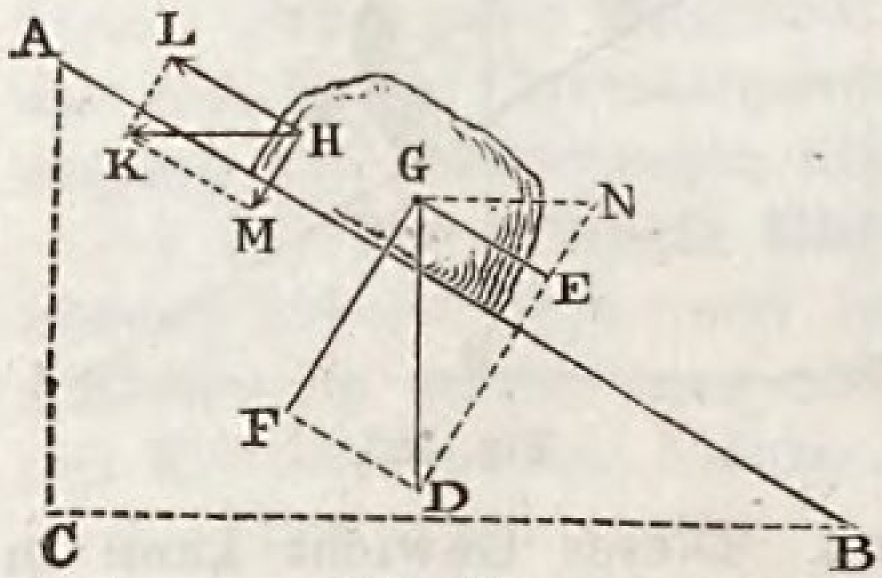


Fig. 138.

das Verhältniss von AC zu BC. Man kann daher folgenden Satz aussprechen: Wenn eine horizontal wirkende Kraft HK dem auf der schiefen Ebene liegenden Körper das Gleichgewicht halten soll, so muss sie sich zum Gewicht des Körpers verhalten, wie die Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Basis. — Es ist klar, dass in dem eben behandelten Fall zu dem Druck GF, welchen der Körper in Folge seines Gewichts senkrecht auf die schiefe Ebene ausübt, auch noch ein Druck HM kommt, welcher von der Kraft HK herrührt. Derselbe verhält sich wegen der Aehnlichkeit der Dreiecke HMK und ABC zur Kraft HK, wie die Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Länge.

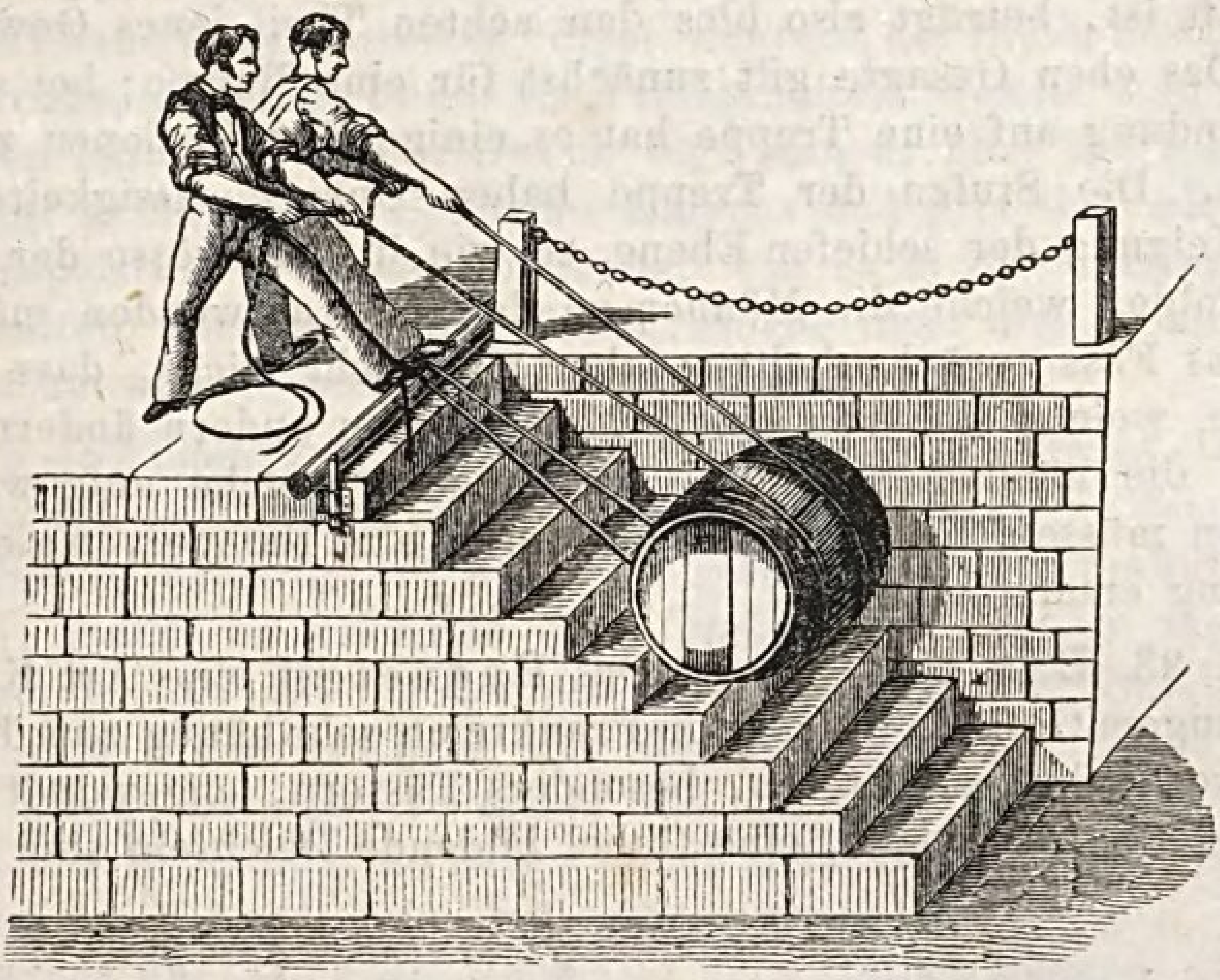


Fig. 139.

§. 92. Manchmal bedient man sich des in Fig. 139 dargestellten Mittels, um schwere Fässer eine Stiege oder eine Rampe hinunter zu schaffen: Zwei Seile sind mit ihrem einen Ende an ein Stück Holz befestigt, welches oben an der Stiege quer herüberliegt und in dieser Lage gut befestigt ist. Diese Seile gehen längs der schiefen Ebene abwärts, unter dem Fasse durch und, nachdem sie sich um den halben Umfang des Fasses gelegt haben, parallel zu ihrer ursprünglichen Richtung wieder aufwärts. Oben werden ihre andern Enden von zwei Männern gehalten, die mit hinreichender Kraft daran ziehen, um das Fass im Gleichgewicht zu halten. Wenn diese Männer die Seile langsam durch die Hände gleiten lassen, so können sie das Fass so sanft als sie wollen hinablassen.

Wenn die beiden Seile das Fass in gleichen Entfernungen von seinen Enden umfassen, so haben die beiden Männer den nämlichen Widerstand zu leisten: andererseits sind die beiden Seilstücke, welche auf der schiefen Ebene aufruhen, ebenso stark gespannt als die andern. Es wirken also auf das Fass vier gleiche, unter sich und zur schiefen Ebene parallele Kräfte; diese vier Kräfte haben eine Mittelkraft, viermal so gross als jede von ihnen, und diese muss das Fass auf der schiefen Ebene im Gleichgewicht halten. Nehmen wir nun an, dass die Höhe der schiefen Ebene die Hälfte ihrer Länge beträgt, so muss jene Mittelkraft die Hälfte des Gewichts des Fasses sein; die von jedem der beiden Männer aufzuwendende Kraft, die viermal so klein als diese Mittelkraft ist, beträgt also blos den achten Theil jenes Gewichts.

Das eben Gesagte gilt zunächst für eine Rampe; bei seiner Anwendung auf eine Treppe hat es einige Modificationen zu erleiden. Die Stufen der Treppe haben Unregelmässigkeiten in der Neigung der schiefen Ebene, so wie in der Grösse der Kraft zur Folge, welche die Männer an dem Seil aufwenden müssen, um das Fass zurückzuhalten; aber man sieht leicht, dass diese Kräfte, welche sich von einem Moment zum andern ändern, im Mittel die nämlichen sind als diejenigen, welche aufgewendet werden müssen, wenn die Treppe durch eine Rampe von gleicher Neigung ersetzt wird.

§. 93. **Das Haquet.** — Das Haquet ist eine Art Karren mit langem Gestell, welcher in Frankreich sehr häufig zum Transport von schweren Lasten, besonders Fässern, angewandt wird (Fig. 140). Die beiden, eine Gabel bildende Deichseln sind nicht

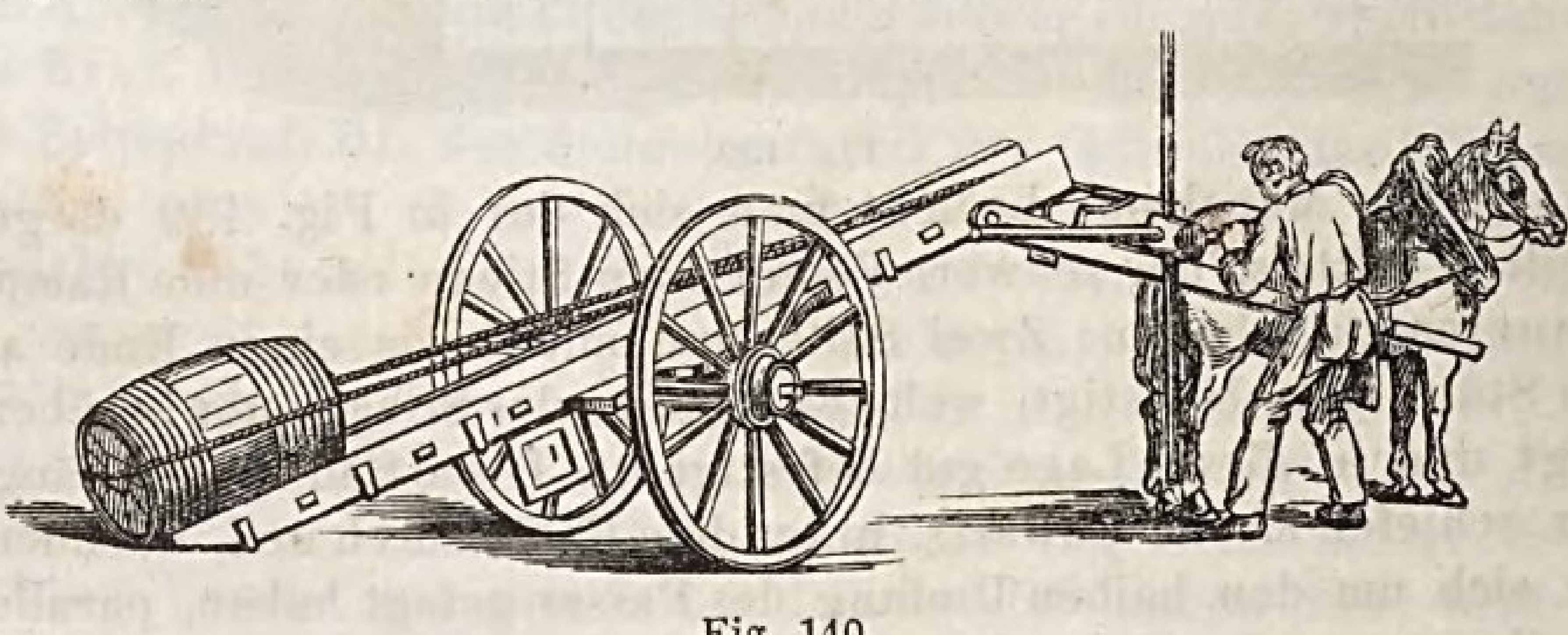


Fig. 140.

in einem Stück mit dem Gestell, sondern blos durch einen grossen eisernen Bolzen, welcher quer durch den vordersten Theil desselben hindurchgeht, mit ihm verbunden und können sich frei um ihre hintern Enden drehen. Diese Art Verbindung gestattet, das Ge-

stell um die Radachsen zu drehen, bis sein hinteres Ende auf dem Boden aufsteht. Bei dieser Bewegung wird die Lage der Gabeldeichsel nicht viel verändert und daher das Pferd nicht im geringsten belästigt. Das in eine solche Lage gebrachte Gestell bildet eine schiefe Ebene, und das Auf- und Abladen der Lasten kann also viel leichter geschehen, als bei den gewöhnlichen Karren. Die Gabeldeichsel trägt überdies in der Nähe ihrer Verbindung mit dem Gestell einen Haspel, mit dessen Hilfe es einem einzigen Manne möglich ist, bedeutende Lasten aufzuladen.

Wenn das Haquet beladen ist, so erhebt man das hintere Ende des Gestells, bis dieses seine horizontale Lage wieder annimmt. Das Seil, welches dazu bestimmt ist, die Laststücke die schiefe Ebene hinaufzuziehen, dient während der Dauer des Transportes dazu, dieselben in der Lage festzuhalten, welche man ihnen gegeben hat. Zu diesem Zweck legt man es über die Ladung, befestigt es hinten am Ende des Karrens und gibt ihm mit Hilfe des Haspels die gehörige Spannung. Um es in dieser Spannung zu erhalten, wird einer der Hebel, welche dazu dienen, auf den Haspel zu wirken, an der Deichsel befestigt.

Es wird leicht sein, die Grösse der Kraft zu bestimmen, welche ein Mensch aufzubieten hat, um einen Körper, der an dem Seile des Haspels befestigt ist, über das geneigte Gestell heraufzubewegen, indem er am Ende eines Hebels des Haspels angreift. Nehmen wir an, dass in der geneigten Stellung des Gestells die Höhe seines vorderen Endes über dem Erdboden den vierten Theil seiner Länge betrage, so muss, wie wir oben in §. 91 gesehen haben, die Spannung des Seiles gleich dem vierten Theil des Gewichtes des Körpers sein, der emporgezogen werden soll. Wenn nun ferner die Länge des Hebels an dem Haspel zehnmal grösser als der Halbmesser der Haspelwelle ist, so kann die von dem Manne aufzubietende Kraft zehnmal kleiner als die Spannung des Seiles, also 40mal kleiner als das Gewicht des aufzuladenden Körpers sein. Man kann also mit einer Kraft von 30^k, welche am Ende eines Hebels des Haspels wirkt, eine Last von 1200^k das Haquet hinauf ziehen.

Die Erfindung dieser Maschine, die eine gelungene Verbindung der schiefen Ebene mit dem Haspel ist, rührt von *Pascal* her. Bei uns in Deutschland begnügt man sich damit, an den zu beladenden Wagen eine starke Leiter, sog. Schrotleiter, anzulehnen und auf dieser so gebildeten schiefen Ebene die Last hinaufzuwälzen.

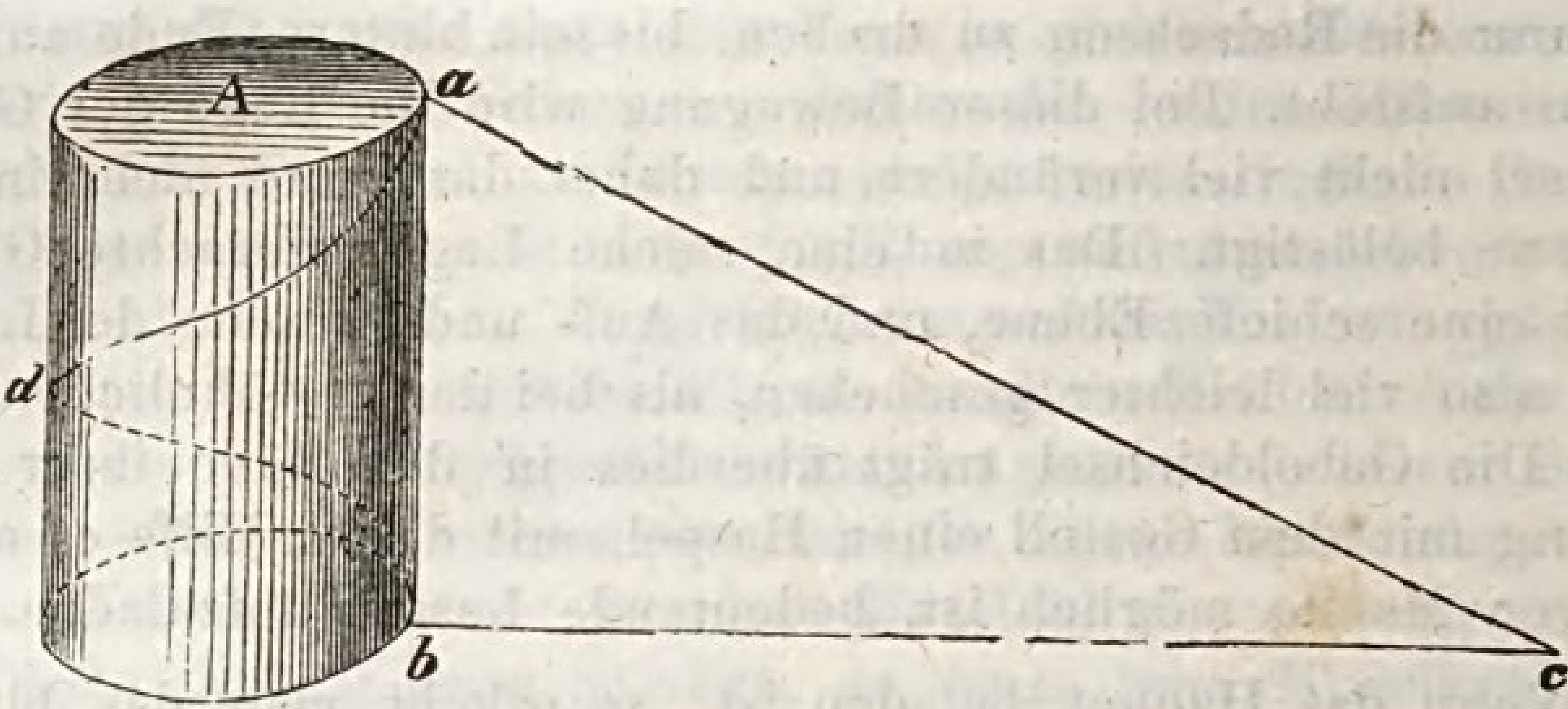


Fig. 141.

§. 94. **Die Schraube.** — Wenn man sich das rechtwinklige Dreieck *abc* (Fig. 141), dessen eine Kathete *bc* gleich dem Umfang des Cylinders A ist, um diesen Cylinder herumgelegt denkt, so bedeckt die Kathete *bc* die Peripherie der Grundfläche, während die Hypotenuse *ac* eine um den Cylinder gehende krumme Linie *adb* bildet, die man Schraubenlinie nennt. Das Stück *ab*, um welches sich diese Linie erhebt, während sie gerade einmal von *b* über *d* nach *a* um den Cylinder herumgegangen ist, heisst ihre Ganghöhe, und das zwischen *b* und *a* gelegene Stück der Linie selbst ein Gang. Es ist klar, dass auf einen entsprechend langen Cylinder beliebig viele solche Gänge aneinander gereiht werden können. Wenn in den Cylinder längs der Schraubenlinie *bda* Vertiefungen, Gänge, eingeschnitten werden, so erhält man ein Schraubengewinde, welches ein flaches heisst, wenn die Querschnitte jener Vertiefungen und der dadurch entstehenden Erhöhungen Rechtecke sind (Fig. 142), ein scharfes dagegen, wenn jene Querschnitte Dreiecke bilden (Fig. 143). In beiden Fällen ist die Entfernung der Punkte *a* und *b* die Ganghöhe der Schraube. Die eben beschriebenen Schraubengewinde heissen speciell Schraubenspindeln; zu ihnen gehört immer noch ein zweites, die sog. Schraubenmutter, deren Windungen in eine cylindrische Höhlung eingeschnitten sind, und in welche die der Schrauben-

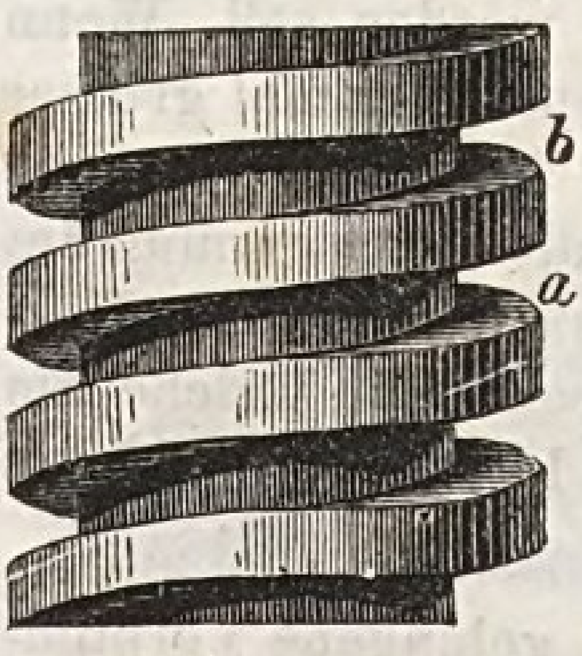


Fig. 142.

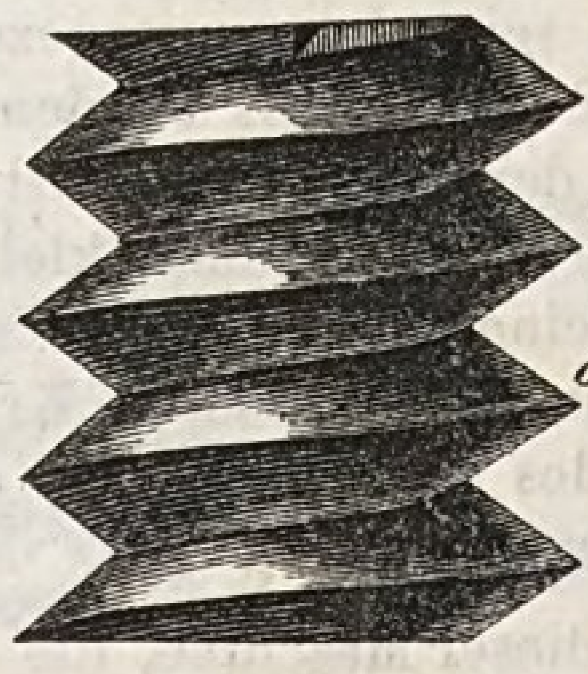


Fig. 143.

spindel genau hineinpassen. Fig. 144 stellt die eine Hälfte einer Schraubenmutter dar, welche zu der in Fig. 142 abgebildeten Schraubenspindel gehört. — Wenn die Ganghöhe einer Schraube etwas gross werden muss, so müssen die einzuschneidenden Windungen im Verhältniss zu ihrer Tiefe ziemlich breit werden, wenn nicht der Körper der Schraubenspindel zu schwach werden soll. Um dies zu vermeiden, schneidet man zwei, drei, vier Gewinde neben einander in die Spindel und Mutter ein, wodurch man eine doppelte, dreifache, vierfache Schraube erhält. Fig. 145 stellt eine doppelte Schraube vor; die Ganghöhe eines Gewindes derselben ist offenbar die Entfernung der Punkte *a* und *b*. Uebrigens gilt für die mehrfachen Schrauben ganz dasselbe wie für die einfachen.

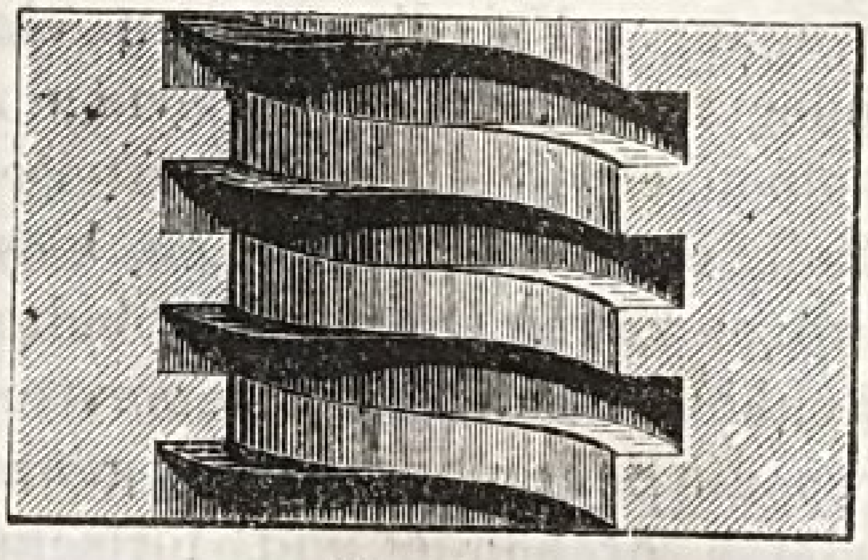


Fig. 144.

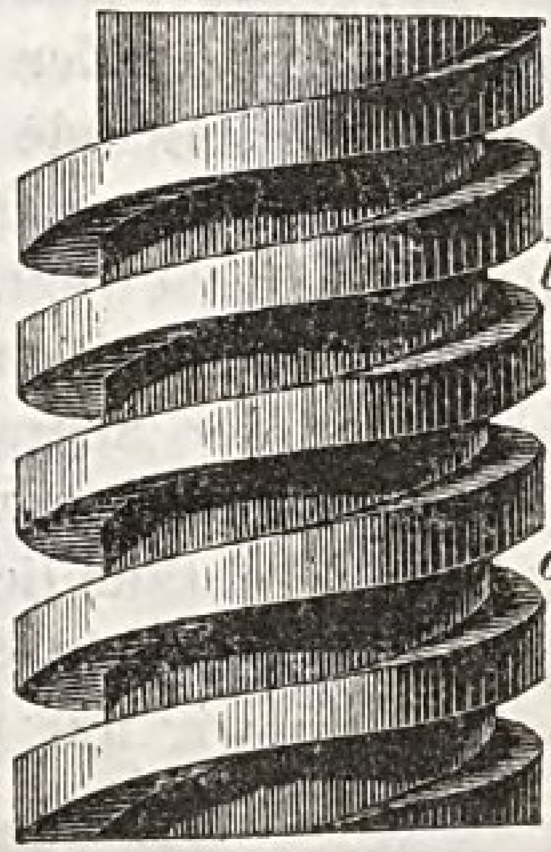


Fig. 145.

Bei dem Gebrauch der Schraube wird entweder die Schraubenspindel oder die Schraubenmutter gedreht. In dem ersten Fall ist wieder die Schraubenmutter entweder ganz fest, und dann nimmt die Schraubenspindel neben ihrer drehenden zugleich eine fortschreitende Bewegung an; oder es kann sich die Schraubenmutter längs der Achse der Schraube bewegen (aber nicht drehen), so nimmt sie diese Bewegung an, vorausgesetzt, dass sich die Spindel blos drehen, aber nicht vorwärts bewegen kann. In dem zweiten Fall ist die Schraubenspindel entweder ganz festgehalten, und dann bewegt sich die Schraubenmutter zugleich mit ihrer Drehung vorwärts; oder es ist der Spindel eine fortschreitende Bewegung gestattet, so nimmt sie dieselbe an, vorausgesetzt, dass sich die Mutter blos drehen, nicht aber vorwärts bewegen kann. Für alle diese Fälle findet man leicht Beispiele. Bei den Schrauben, die zur Befestigung eines Körpers an einen andern dienen und zu diesem Behufe in eine schon vorhandene oder in eine solche Schraubenmutter eingeschraubt werden, die sie sich in weichen Körpern, Holz z. B. erst selbst bilden, ist die Schraubenmutter ganz fest, und die Spindel hat eine zugleich drehende und fortschreitende Be-

wegung. Um die Backen eines Schraubstocks einander nähern oder von einander entfernen zu können, ist in dem einen derselben eine Schraubenmutter eingeschnitten, in welcher sich eine Spindel bewegt, die sich blos drehen, aber nicht vorwärts bewegen kann. Die zur Verbindung zweier Körper dienenden Schraubenbolzen mit Schraubenmuttern geben ein Beispiel für den Fall, wo die Schraubenspindel ganz fest steht und die Mutter eine zugleich drehende und fortschreitende Bewegung hat. Bei den Bremsen, welche man häufig an den Hinterrädern der Wägen angebracht sieht, erhält gewöhnlich die Mutter eine blos drehende Bewegung, während die Spindel, welche an dieser Drehung Theil zu nehmen verhindert ist, eine blos fortschreitende Bewegung annimmt.

Bei genauer Betrachtung des Vorgangs, welcher in allen Fällen der Anwendung der Schraube stattfindet, sieht man, dass sich allemal das Gewinde des fortschreitenden Theils, der Spindel oder der Mutter, längs des Gewindes des andern wie auf einer schiefen Ebene hinaufbewegt, und dass gewöhnlich der von dem fortschreitenden Theil zu überwindende Widerstand in der Richtung der Achse der Schraube, also senkrecht zur Basis der schiefen Ebene ausgeübt wird. Es ist also die Schraube nichts anderes als eine eigenthümliche Art der schiefen Ebene, und wir können auf dieselbe die in §. 91 erhaltenen Resultate unverändert anwenden, wenn wir nur unter der Länge, Höhe und Basis der schiefen Ebene hier beziehungsweise die Länge eines Schraubenganges, die Ganghöhe der Schraube und den Umfang des Schraubencylinders verstehen. In Fig. 146 sei A eine Schraubenspindel, welche in der ganz feststehenden Mutter M in passender Weise gedreht wird, so dass sie sich zugleich aufwärts bewegt. Die Drehung geschieht mittelst der Hebel BB, die durch Löcher gesteckt werden, welche in dem Kopfe C angebracht sind. Den Widerstand, welchen die Schraube bei ihrer Fortbewegung zu überwinden hat, stellen wir

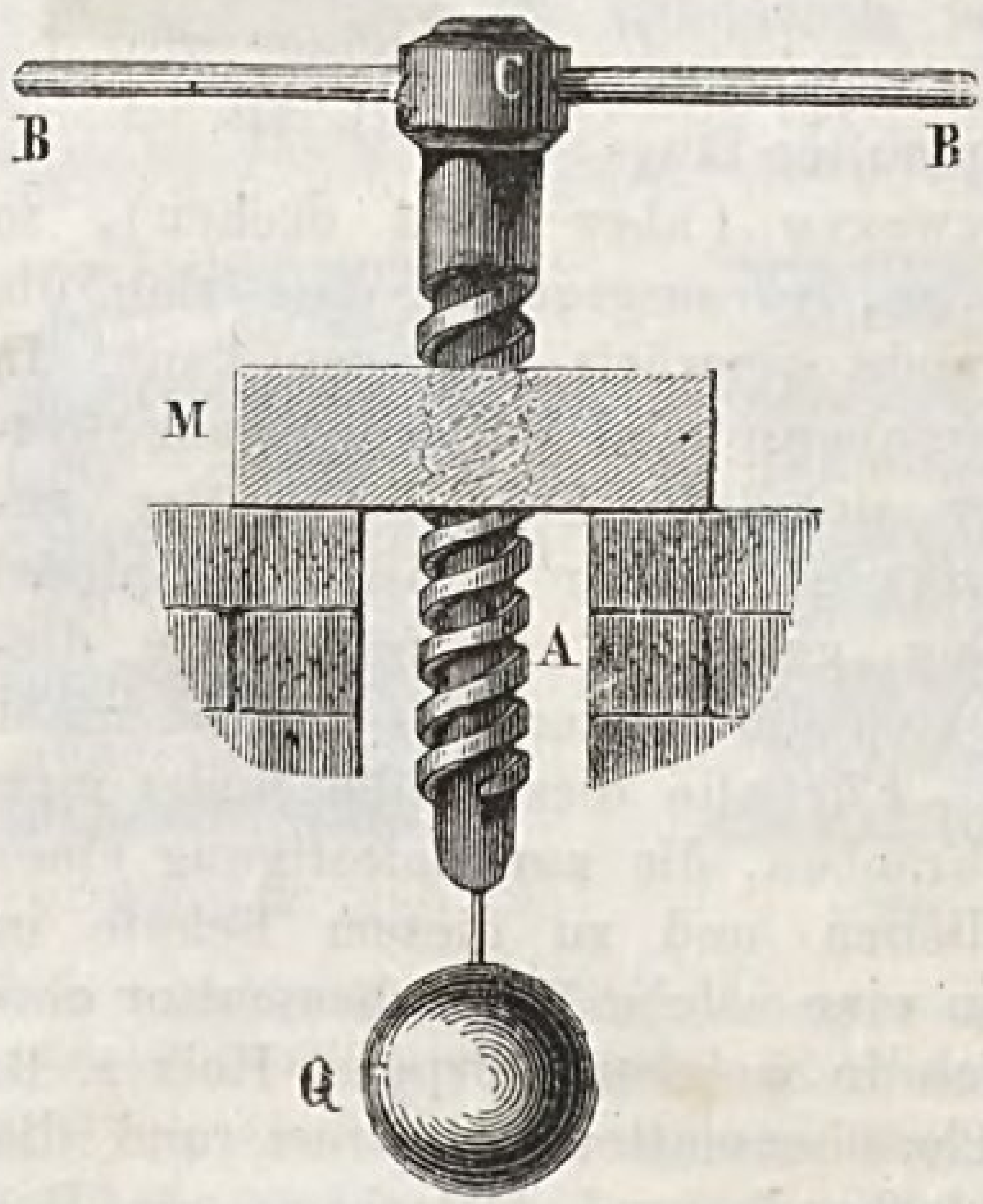


Fig. 146.

uns in Form eines Gewichtes Q vor, welches in der Verlängerung ihrer Achse aufgehängt ist, und welches emporgehoben werden soll. Wir nehmen, um die Untersuchung zu vereinfachen, an, dass die Länge eines der Arme BB sechsmal so gross als der Halbmesser der Schraubenspindel, und die Ganghöhe der Schraube zehnmal so klein als der Umfang derselben sei. Denkt man sich die Schraubenspindel durch eine Kraft herumgedreht, die unmittelbar an ihrem Umfang wirkt, so muss diese Kraft den zehnten Theil des Gewichtes Q betragen (§. 91); denn sie wirkt parallel zur Basis der schiefen Ebene und muss sich daher zur Last Q, welche die schiefe Ebene hinaufbewegt werden soll, verhalten wie die Höhe derselben zu ihrer Basis. Da aber die zur Drehung der Schraube aufgewendete Kraft am Ende des Hebels B wirkt, so darf sie blos den sechsten Theil der am Umfang des Cylinders wirkenden, im Ganzen also den sechzigsten Theil des zu überwindenden Widerstandes betragen. Wenn an beiden Hebelarmen BB zugleich angegriffen wird, so darf natürlich der Druck auf jeden blos die Hälfte des vorigen, vom ganzen Widerstand also der 120. Theil sein.

Der Druck, welchen in Folge des Gewichtes Q die Gänge der Schraubenspindel senkrecht gegen die Gänge der Schraubenmutter ausüben, ist nach dem, was am Schlusse des §. 91 gesagt wurde, leicht aufzufinden. Er ist, wie sich sofort ergibt, um so grösser, je geringer die Steigung der Schraube, d. h. das Verhältniss ihrer Ganghöhe zu ihrem Umfang, je kleiner also die Kraft ist, die ohne die Reibung zur Bewegung erforderlich ist. Die Reibung aber ist, in Folge dieses Druckes, bei den Schrauben sehr bedeutend, zumal wenn nicht Spindel und Mutter von Metall und immer gut geschmiert sind. In Bezug auf solche Schrauben, die zur Befestigung dienen, die also durch den Druck, welchen sie beim Anschrauben ausüben und umgekehrt selbst wieder auszuhalten haben, nicht rückwärts getrieben werden sollen, mag die Bemerkung nicht überflüssig sein, dass die Reibung mindestens eben so gross als die zur Ueberwindung jenes Drucks erforderliche Kraft bei Vernachlässigung der Reibung, dass also die auszuübende Kraft an solchen Schrauben, die nicht von selbst rückwärts gehen sollen, mindestens doppelt so gross mit, als ohne Einrechnung der Reibung ist.

§. 95. Wir werden später häufig Gelegenheit erhalten, Anwendungen der Schraube kennen zu lernen. Für jetzt mögen daher folgende zwei Beispiele genügen.

1) Der Parallelschraubstock (Fig. 147). Der eine Backen A desselben steht fest, und in ihm kann sich der Anfang, in dem Gegenstücke D das Ende der Schraubenspindel C C drehen; eine Verschiebung derselben ist durch den vorn angebrachten Kopf verhindert. In dem anderen Backen B ist unten die Mutter für jene Spindel eingeschnitten. Zugleich wird dieser Backen durch die Geradführung E F verhindert, sich mit der Spindel zu drehen. Wenn diese daher in passendem Sinne gedreht wird, so nähert sich der Backen B dem A und klemmt den einzuspannenden Körper fest. Man sieht, dass dieser Schraubstock vor dem gewöhnlichen den Vorzug hat, dass sich die inneren Flächen der beiden Backen, wo sie den eingespannten Körper festhalten, bei jeder Entfernung, die sie bekommen, parallel bleiben.

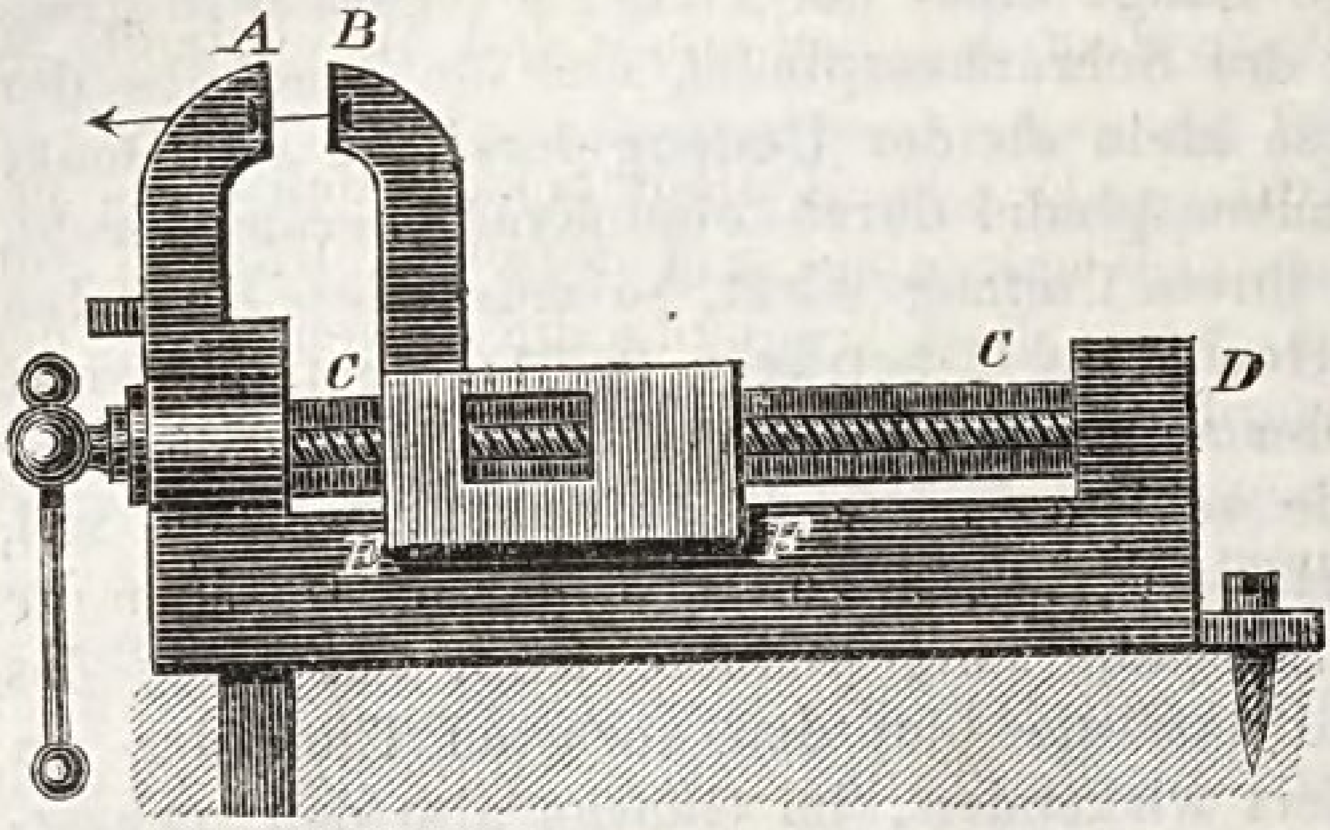


Fig. 147.

2) Eine zweckmässige Verbindung von Zahnrädern und Schrauben zeigt die Schraubenwinde (Fig. 148), die in neuerer Zeit öfters statt der in §. 87 beschriebenen Wagenwinde angewandt wird. Durch Drehung der Doppelkurbel F, F wird das Trieb E und durch dieses das Zahnrad D herumbewegt. Mit dem Zahnrad D ist die Mutter C fest verbunden, sodass sie sich zwar mit diesem drehen, nicht aber der Länge nach verschieben kann. Die Schraube von grosser Steigung, welche von jener Mutter umschlossen wird, und die selbst in ein Gehäuse eingeschlossen

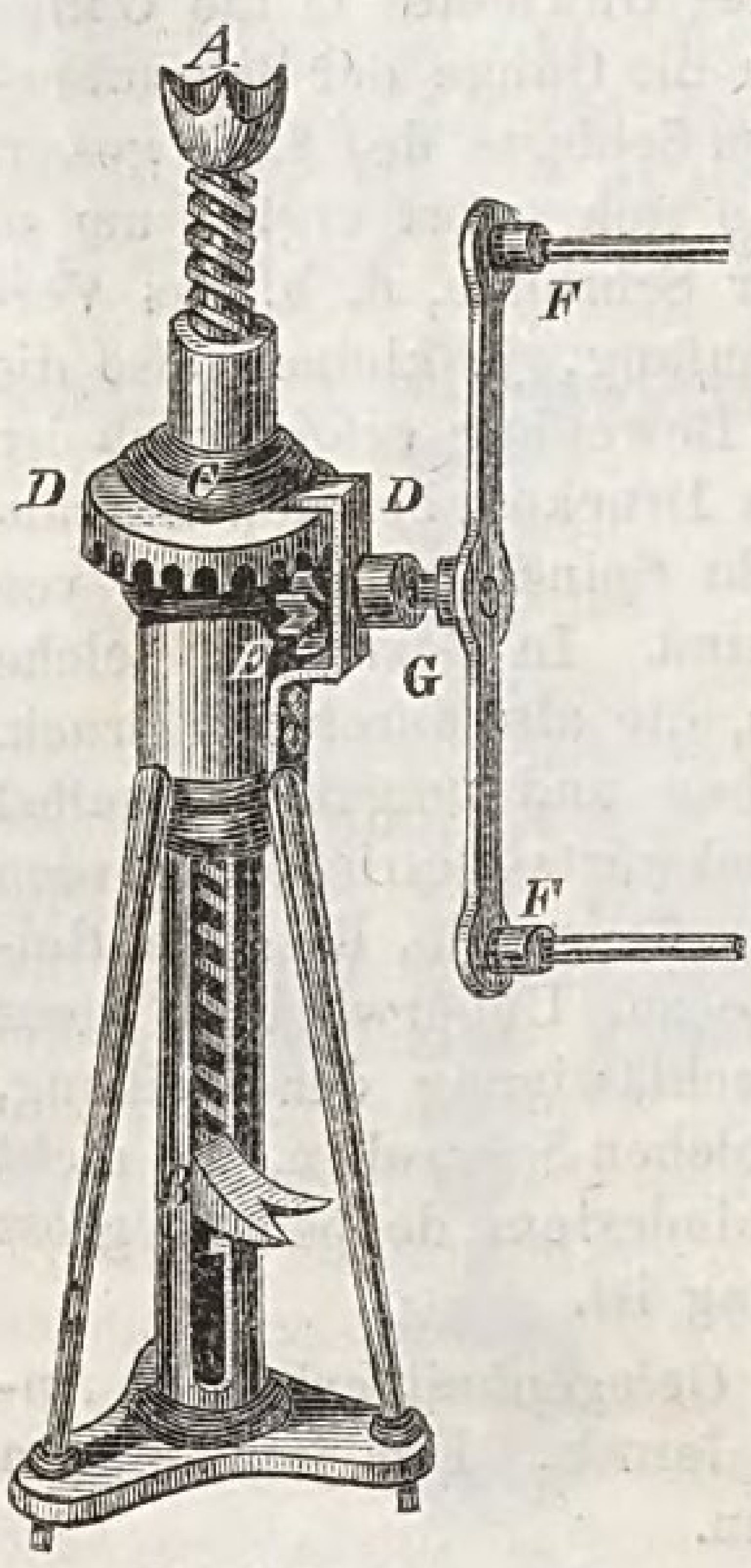


Fig. 148.

ist, wird durch die Klauen B verhindert, sich mit der Mutter zu drehen, und kann sich folglich blos ihrer Länge nach verschieben. Es wird nach dem Vorhergehenden leicht sein, die Wirkung dieser Winde, das Verhältniss der an der Kurbel aufzuwendenden Kraft zu dem zu überwindenden Widerstand, zu ermitteln.

§. 96. **Der Keil.** — Der Keil dient bekanntlich dazu, um zwei Körper oder zwei Theile eines und desselben Körpers von einander zu trennen, wenn diese Trennung die Anwendung einer grösseren Kraft erfordert. So wird er namentlich zum Spalten des Brennholzes angewendet. Aber auch bei Maschinen findet man ihn oft gebraucht, um durch sein Eintreiben zwischen einen festen und einen beweglichen Theil den letzteren in gewisser Richtung mit grosser Kraft vorwärts zu schieben. Er ist weiter nichts als ein dreiseitiges Prisma ABC (Fig. 149) von Holz oder Eisen, dessen eine Seite AB im Vergleich mit den beiden andern AC und BC nur klein ist; diese beiden letzteren Seiten selbst sind gleich gross, das Prisma also ein gleichschenkliges. Wenn man senkrecht auf die Seite AB, welche der Rücken des Keils heisst, eine Kraft von genügender Grösse wirken lässt, so dringt in Folge dessen der Keil in den schon vorher gemachten Spalt ein, wodurch eine Entfernung der Ränder dieses Spaltes, die mit dem Keil in Berührung stehen, hervorgebracht wird.

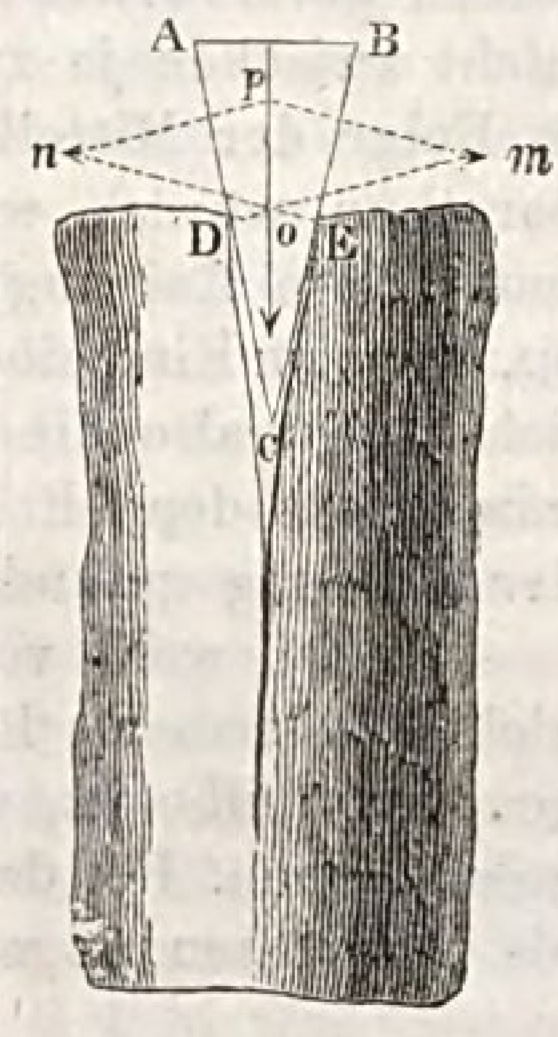


Fig. 149.

Um uns über die Wirkungsweise des Keils Rechenschaft zu geben, suchen wir die Grösse der Kraft zu finden, welche auf den Rücken AB desselben ausgeübt werden muss, um den Pressungen, welche er in D und F von den Rändern des Spaltes erleidet, einfach das Gleichgewicht zu halten. Diese Drückungen denken wir uns senkrecht auf die Seiten AC und BC und können sie daher durch die Linien om und on vorstellen, da man ihre Angriffspunkte von D oder E nach o verlegen kann. Wenn man über diesen beiden Linien das Parallelogramm $monp$ construirt, so stellt die Diagonale op desselben die Mittelkraft jener beiden Pressungen vor. Damit also die auf die Rückenfläche des Keiles ausgeübte Kraft den Drückungen om und on das Gleichgewicht hält, muss die Resultante dieser letzteren gleich und entgegengesetzt jener Kraft sein, es muss folglich op senk-

recht auf AB stehen; da aber *om* und *pm* auch bezüglich senkrecht auf AC und BC stehen, so sind die Dreiecke *omp* und ABC einander ähnlich. Daraus folgt zunächst, dass, weil AC gleich BC ist, *om* dieselbe Grösse wie *pm* oder *on* hat, d. h. die beiden Seitenflächen des Keiles erleiden in D und E gleich grosse Pressungen. Ferner kann man daraus schliessen, dass das Verhältniss der Kraft, welche auf die Rückenfläche AB des Keiles wirkt, zu einer der beiden Seitenpressungen, gleich ist dem Verhältniss der Linie AB zu einer der Linien AC, BC. Man sieht also, dass die Kraft, welche die Entfernung der Punkte D und E zu bewirken hat, um so kleiner werden darf, je spitzer der Winkel ABC wird.

Das so gefundene Resultat wird aber wieder beträchtlich durch die Reibung modificirt. Die auf den Rücken des Keils auszuübende Kraft wird gewöhnlich durch Schläge, die auf denselben geführt werden, hervorgebracht. Wenn daher der Keil nicht zwischen je zwei Schlägen herausspringen soll, wie er es in Folge der Mittelkraft *op* der Pressungen *om* und *on* unfehlbar thun würde, wenn die Reibung nicht vorhanden wäre, so muss diese Reibung mindestens ebenso gross sein, als die Kraft *op*, die zum Eintreiben ohne die Reibung erforderlich ist. In Wirklichkeit ist also die zum Eintreiben des Keils erforderliche Kraft mindestens doppelt so gross als die oben ohne Berücksichtigung der Reibung gefundene.

Es ist wohl von selbst klar, dass alle Schneidinstrumente nichts anderes als keilförmige Körper sind, deren Wirkungsweise genau dieselbe ist, wie wir sie eben vom Keil speciell auseinander gelegt haben. Bei den Keilpressen, die besonders früher häufig als Oelpressen angewandt wurden, werden die nach der Seite des Keils hin wirkenden Kräfte, welche aus der auf den Rücken ausgeübten folgen, dazu benützt, um das Oel aus dem in die Presse gebrachten Samen auszupressen. Ihre Einrichtung ist aus Fig. 150 wohl von selbst klar; es möge nur bemerkt werden, dass

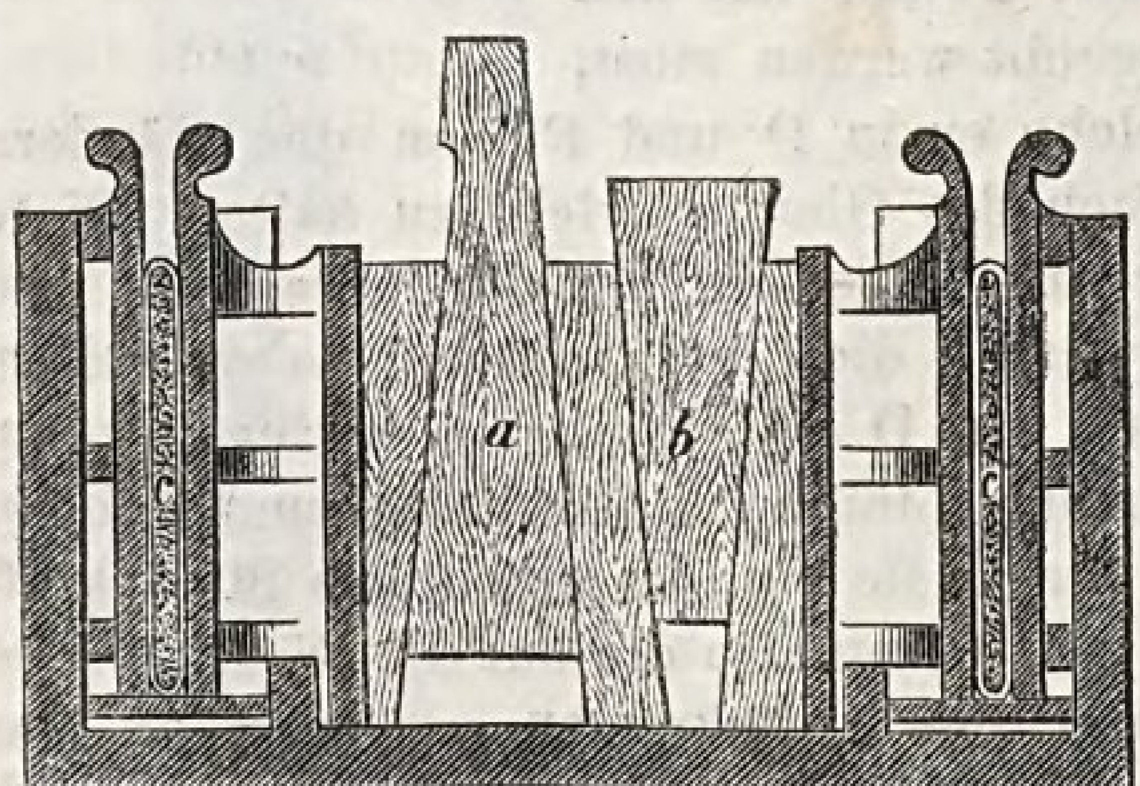


Fig. 150.

der Keil *a* zum Oeffnen, der *b* zum Schliessen der Presse dient, und dass beide, wenn sie in Wirksamkeit treten sollen, durch Schläge abwärts getrieben werden.

§. 97. **Gleichgewicht von Kräften an Seilen oder Ketten, Seilpolygon.** — Wir haben bisher immer vorausgesetzt, dass die Körper- oder Maschinentheile, auf welche die Kräfte wirkten, absolut unveränderlich oder starr seien (vgl. §. 25). Diese Annahme ist nicht mehr zulässig bei Seilen oder Ketten, die wir als vollkommen biegsam voraussetzen; ein solcher Körper erträgt nur einen Zug seiner Länge nach. In dieser Richtung nehmen wir ihn dann aber auch als unveränderlich d. h. als unausdehnbar an.

In dem einfachsten Fall, wo an den Enden eines solchen Seilstückes nur zwei Kräfte wirken, an jedem eine, kommen dieselben offenbar nicht eher ins Gleichgewicht, als bis sie das Seilstück gerade gestreckt und sich selbst in die Richtung dieser Geraden und zwar so gestellt haben, dass sie beide nach entgegengesetzten Richtungen hin an dem Seile ziehen. Ausserdem müssen sie natürlich noch gleich gross sein. — Man hat ein einfaches Beispiel für diesen Fall an einem schweren Körper, der an einer Schnur aufgehängt ist. Die Schnur stellt sich vertikal, in die Richtung des Gewichts des Körpers, und die Kraft, welche man sich am Aufhängepunkt vertikal aufwärts an der Schnur wirkend denken muss, ist gleich dem Gewichte des aufgehängten Körpers, von dem Gewichte der Schnur selbst abgesehen, wie wir das im Folgenden immer thun, wenn nicht ausdrücklich das Gegentheil gesagt ist. — Die in solcher Weise an dem Seilstück wirkenden Kräfte suchen das Seil zu zerreissen. Sie rufen also im Innern desselben Molekularkräfte, Spannungen hervor, die durch das ganze Seil hindurch von gleicher Grösse und jenen Kräften selbst genau gleich sind (vgl. §. 25). Man nennt diese daher kurzweg auch die Spannungen des Seiles oder Kettenstücks.

Wenn mehrere Seilstücke mit ihren einen Enden fest in einem Knoten vereinigt sind, während an ihren andern Kräfte wirken, so kann man sich nach dem Satze von der Verlegung des Angriffspunktes sämmtliche Kräfte mit ihren Angriffspunkten in den Knoten verlegt denken und sie sind dann nach §. 53 im Gleichgewicht, wenn jede von ihnen gleich und entgegengesetzt der Resultante aus den übrigen ist. — Es seien z. B. zwei von den drei Seilstücken, die von dem Knoten O (Fig. 151) ausgehen, in dem Punkte A und B festgemacht, während an dem dritten ein Gewicht R aufgehängt ist. Dieses dritte stellt sich vertikal,

die beiden andern bilden das durch die drei Seiten AB, AO und OB bestimmte Dreieck. In den Aufhängepunkten A und B kann man sich zwei Kräfte P, Q wirkend denken, gleich den Spannungen der bezüglichen Seilstücke. Die drei Kräfte P, Q, R kann man mit ihren Angriffspunkten nach O verlegen, und es muss dann jede gleich und entgegengesetzt der Resultante aus den beiden übrigen sein. Trägt man daher in der rückwärtigen Verlängerung von OC ein Stück OR′ auf, welches die Kraft R der Grösse und Richtung nach vorstellt, so muss sie die Resultante der in den Seilstücken AO, OB wirkenden Kräfte und daher die Diagonale des Parallelogramms OPR′Q sein, dessen

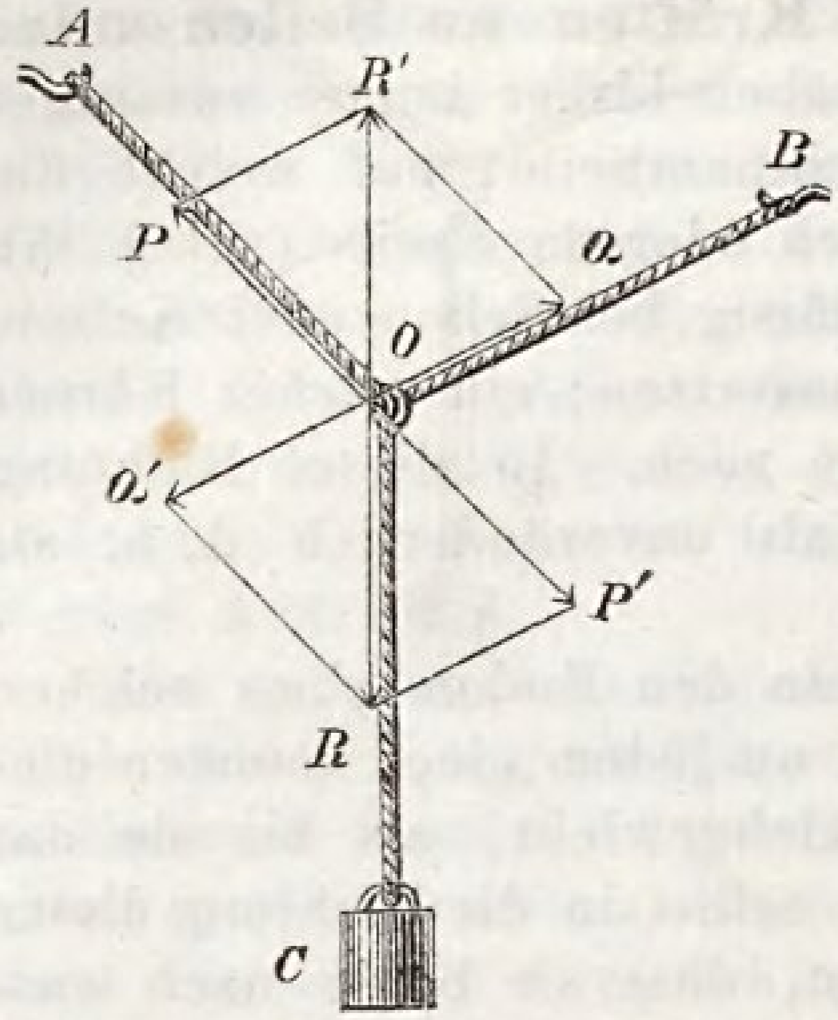


Fig. 151.

Seiten OP und OQ die Spannungen jener Seilstücke sind. Daraus folgt ausserdem, dass die drei Seilstücke nothwendig in einer Ebene gelegen sein müssen (vgl. §. 53). Hätte man die Kraft R in der Richtung OC belassen und in zwei Seitenkräfte OP′, OQ′, die in den rückwärtigen Verlängerungen der Seilstücke OA, OB gelegen sind, zerlegt, so hätten diese, bezüglich gleich OP und OQ, auch die Spannungen der Seilstücke OA, OB repräsentirt. Während OP und OQ eigentlich die in den Punkten A und B wirkenden Kräfte vorstellen, geben OP′ und OQ′ die durch den Zug der Kraft R an den Seilstücken AO und OB hervorgebrachten Spannungen.

Wenn zwei von den, von einem Knotenpunkt ausgehenden Seilstücken zu einem einzigen Stück verbunden sind, während sich die Enden der andern, etwa in einem Ring vereinigt, längs jenes leicht verschieben können, so ist klar, dass die beiden ersten Stücke stets gleiche Spannung erhalten müssen, und dass daher das Ganze nicht eher zur Ruhe kommt, als bis die Resultante aus den übrigen Seilstücken den Winkel zwischen jenen beiden ersten halbiert. In dem, aus Fig. 152 von selbst verständlichen Fall muss folglich das Seilstück OP, rückwärts verlängert, den Winkel AOC halbieren. Und die Spannung in diesem Seilstücke findet man, wenn man von O aus längs OB und OC zwei gleiche, das Gewicht R repräsentirende Linien OR′ und OQ aufträgt und in eine Resultante OP′ vereinigt. Die der OP′

gleiche aber entgegengesetzte Kraft ist zugleich offenbar der Zug, welcher von der Hand am Ende des Seilstücks OP ausgeübt wird.

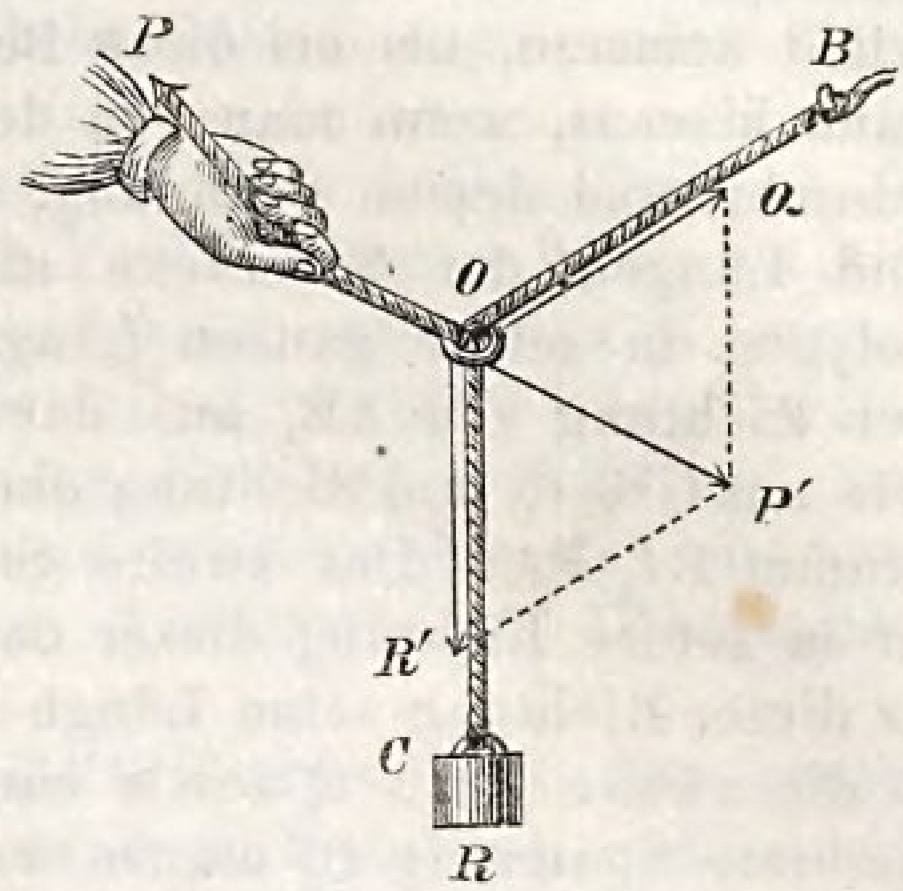


Fig. 152.

§. 98. Wenn ein Seil oder eine Kette mit ihren zwei Endpunkten A und G (Fig. 153) aufgehängt ist, während in den Zwischenpunkten oder Knoten B, C, D..... beliebig gerichtete Kräfte P, Q, R....., wirken, die nicht gerade, wie in Fig. 153 gezeichnet, in einer Ebene gelegen zu sein brauchen, so kommt

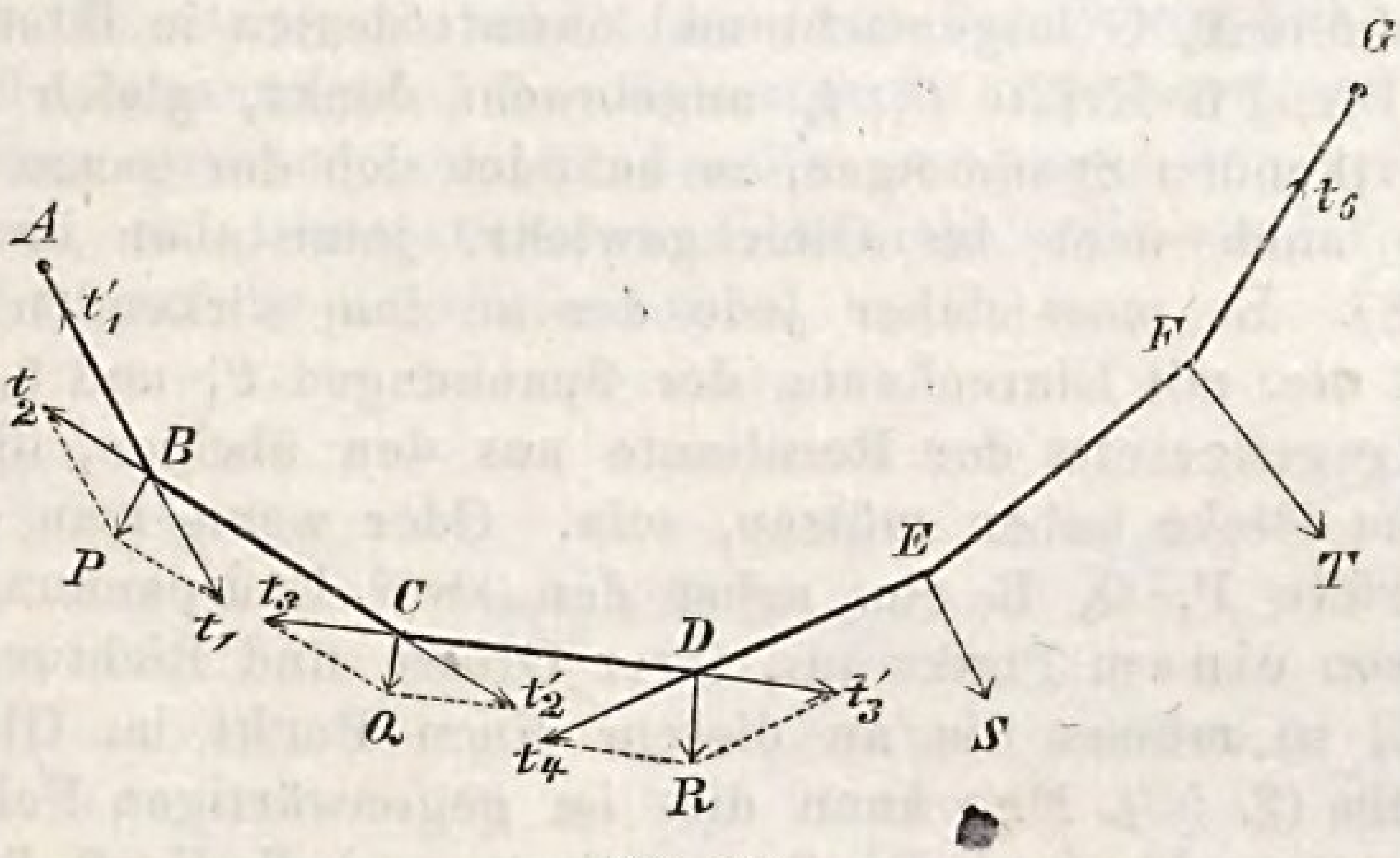


Fig. 153.

das ganze System offenbar nur bei einer bestimmten Gestalt des Polygons (Vielecks) ABCD......G ins Gleichgewicht, welche Gestalt durch die Wirkungen der Kräfte und die Länge der einzelnen Seilstücke bedingt ist. Man nennt das ganze System ein Seilpolygon. Irgend eine der an demselben wirkenden Kräfte, Q z. B. muss offenbar mit den, in ihrem Angriffspunkte zusammenstossenden Seilstücken in einer Ebene liegen; und zerlegt man sie nach den rückwärtigen Verlängerungen jener Seilstücke, so geben die dadurch erhaltenen Seitenkräfte die in denselben wirkenden Spannungen. Verfährt man auf gleiche Weise mit allen gegebenen Kräften, so erhält man für jedes, zwischen den beiden äussersten AB und FG gelegene Seilstück, CD z. B. zwei Spannungen t_3 und t'_3, die natürlich einander gleich sein müssen.

Das System kann eben in keiner anderen Form in's Gleichgewicht kommen, als bis diese Bedingung erfüllt ist. Umgekehrt kann hieraus, wenn man von dem einen der Endstücke, AB z. B. ausgeht, und dessen Spannung, sowie sämmtliche Kräfte P, Q, R und Längen der Seilstücke als gegeben betrachtet, das Seilpolygon in seiner ganzen Länge construirt werden. Denn aus der Richtung von AB, aus der Grösse seiner Spannung A, sowie aus Grösse und Richtung der Kraft P ergibt sich das Parallelogramm Bt_2 Pt_1. Das zweite Seilstück, dessen Spannung t_2 ist, ist in seiner Richtung dieser entgegengesetzt. Trägt man daher in dieser Richtung seine Länge BC auf und bringt in den Punkt C die zweite Kraft Q sowie eine, der t_2 gleiche und entgegengesetzte Spannung t'_2 an, so kann man ebenso wie vorhin verfahren, um die Richtung und Spannung t_3 des dritten Seilstückes zu finden u. s. w.

Wenn man sich die Endstücke AB, FG von ihren Befestigungspunkten A, G losgemacht und anstatt dessen in ihren Richtungen BA, FG Kräfte t'_1, t_6 angebracht denkt, gleich den in ihnen wirkenden Spannungen, so befindet sich das ganze System offenbar auch noch im Gleichgewicht, jetzt aber im freien (s. §. 58). Es muss daher jede der an ihm wirkenden Kräfte P, Q, R etc. mit Einrechnung der Spannungen t'_1 und t_6 gleich und entgegengesetzt der Resultante aus den übrigen, die eben jetzt eine solche haben müssen, sein. Oder wenn man sämmtliche Kräfte P, Q, R etc. nebst den zwei Endspannungen t'_1 und t_6 von einem Punkt aus, ihrer Grösse und Richtung nach aufträgt, so müssen sie an diesem einen Punkt im Gleichgewicht sein (§. 53). Man kann dies im gegenwärtigen Fall auch noch direct nachweisen. Die Spannung t'_1 und die Kraft P geben eine Mittelkraft t_2 in der Richtung BC, die also mit ihrem Angriffspunkt nach C verlegt werden kann. Dort wieder zerlegt, würde sie die Kräfte P und t'_1 wieder geben, so dass nun in dem Punkte C die drei Kräfte t'_1, P und Q wirken. Die aus P und t'_1 resultirende t_2 und Q zusammen geben eine Resultante t_3 in der Richtung DC, welche also nach D verlegt werden kann, so dass dort vier Kräfte: die aus t_3 herkommenden drei t'_1, P und Q und endlich R wirken. So fortfahrend erhält man offenbar zuletzt alle Kräfte nebst den Spannungen t'_1 und t_6 in einem Punkte wirkend.

Ein hübsches Beispiel für die Anwendung der bisherigen Lehren über die Wirkung der Kräfte an Seilen oder Ketten gibt die Aufhängevorrichtung der Oellaternen, welche früher, ehe sie

theilweise durch die Einführung der Gasbeleuchtung verdrängt wurden, allgemein zur Strassenbeleuchtung angewendet worden sind.

Die Kette ABCD (Fig. 154) ist mit ihren beiden Enden A, D an zwei Pfählen befestigt. In dem Punkt C dieser Kette ist die Rolle F eingehängt, während eine Schnur, welche in B festgemacht ist, unter der losen Rolle E, welche die Laterne trägt, durchgeht, worauf sie sich über die beiden Rollen F und G legt, um endlich an einem Nagel befestigt zu werden, der sich in dem Kästchen H befindet, welches zur Aufnahme des Ueberrestes der Schnur dient.

Die Spannung der Schnur BEFGH muss durch ihre ganze Länge die nämliche sein. Die Grösse dieser Spannung erhält man, wenn man auf die Vertikale, welche durch den Punkt E geht, eine Länge E*e* aufträgt, welche das Gewicht der Laterne vorstellt, und durch den Punkt *e* Parallele zu den Schnurtheilen EB und EF zieht; so erhält man ein Parallelogramm, dessen Seiten die Spannungen jener Schnurtheile repräsentiren. Diese Spannungen müssen, wie wir bereits gesehen haben, einander gleich sein, und daher müssen die Schnurtheile EB und EF gleiche Neigung gegen die Vertikale haben.

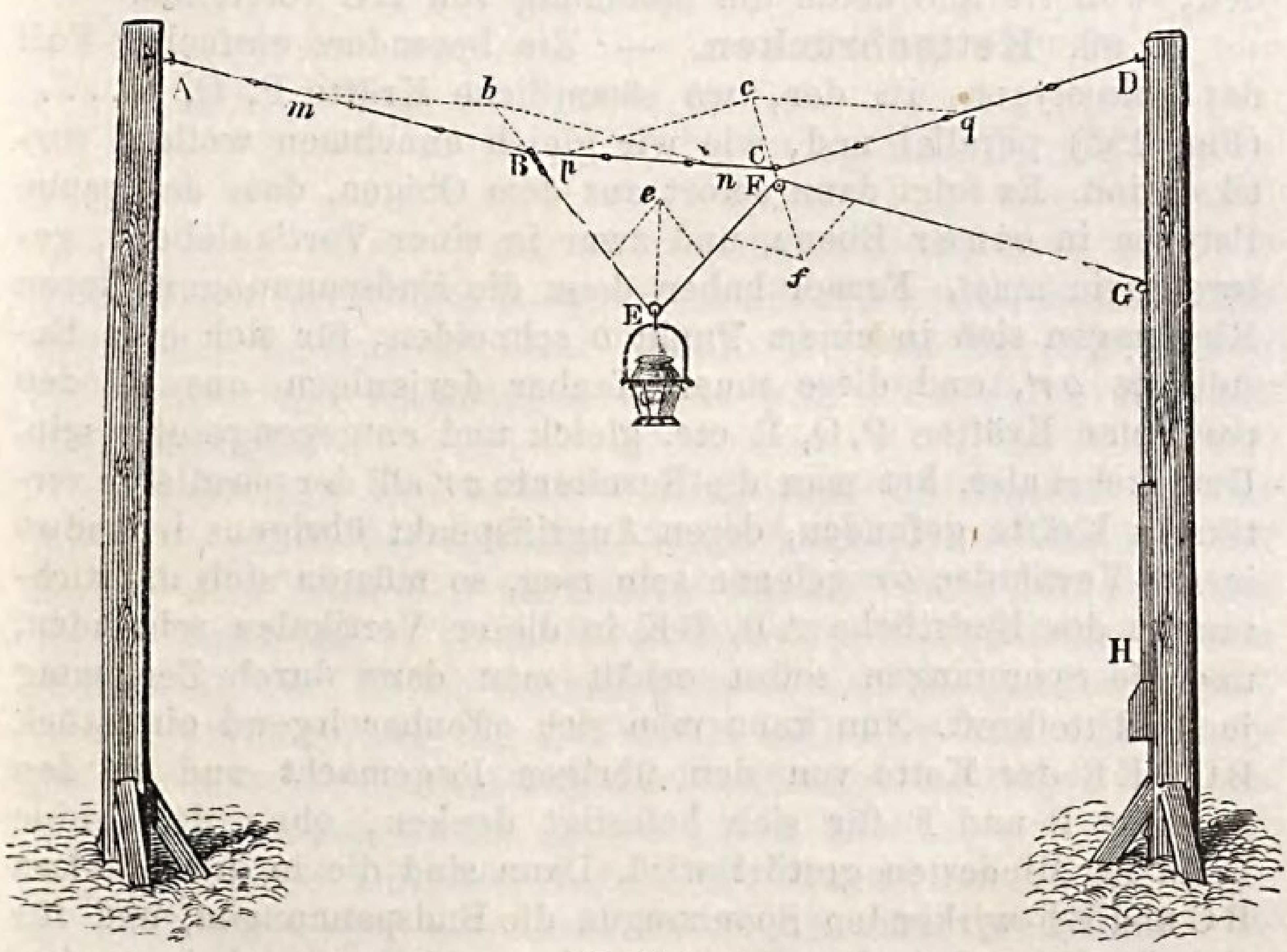


Fig. 154.

Um die Spannungen der drei Theile AB, BC, CD der Kette zu finden, bemerken wir zunächst, dass letztere der Wirkung zweier Kräfte ausgesetzt ist, nämlich 1) der Wirkung einer Kraft in B in der Richtung von BE und gleich der Spannung der Schnur, deren Grösse wir soeben bestimmt haben, und 2) der Wirkung einer Kraft in C, gleich der Resultante F*f* der Spannungen der Schnurtheile EF und FG. Die Spannungen der beiden Theile BA und BC, welche der in der Richtung von BE wirkenden Kraft das Gleichgewicht halten, müssen eine dieser Kraft gleiche und entgegengesetzte Resultante haben. Wenn wir also von dem Punkte B aus auf der rückwärtigen Verlängerung von BE eine Länge B*b* gleich der Spannung der Schnur auftragen, und durch den Punkt *b* Parallele zu den Theilen AB und BC der Kette ziehen, so erhalten wir die Linien B*m* und B*n*, welche die Spannungen dieser Kettenstücke repräsentiren. Ebenso, wenn wir von dem Punkte C aus auf der rückwärtigen Verlängerung von CF*f* eine Länge C*c* gleich F*f* auftragen und das Parallelogramm C*pcq* construiren, so repräsentiren die Linien C*p*, C*q* die Spannungen der Kettentheile BC und CD. Die Kette wird nun offenbar eine solche Form annehmen müssen, dass die Linien B*n* und C*p*, die wir soeben bestimmt haben, einander gleich werden, weil sie alle beide die Spannung von BC vorstellen.

§. 99. **Kettenbrücken.** — Ein besonders einfacher Fall des Seilpolygons ist der, wo sämmtliche Kräfte P, Q, R..... (Fig. 155) parallel und, wie wir gleich annehmen wollen, vertikal sind. Es folgt dann sofort aus dem Obigen, dass das ganze Polygon in einer Ebene, und zwar in einer Vertikalebene, gelegen sein muss. Ferner haben dann die Endspannungen, deren Richtungen sich in einem Punkt *o* schneiden, für sich eine Resultante *or'*, und diese muss offenbar derjenigen aus all den parallelen Kräften P, Q, R etc. gleich und entgegengesetzt sein. Umgekehrt also, hat man die Resultante *or* all' der parallelen vertikalen Kräfte gefunden, deren Angriffspunkt übrigens irgendwo in der Vertikalen *or* gelegen sein mag, so müssen sich die Richtungen der Endstücke AB, HK in dieser Vertikalen schneiden, und die Spannungen selbst erhält man dann durch Zerlegung jener Mittelkraft. Nun kann man sich offenbar irgend ein Stück BCDEF der Kette von den übrigen losgemacht und in den Punkten B und F für sich befestigt denken, ohne dass seine Form im Mindesten gestört wird. Dann sind die in den Stücken BC und EF wirkenden Spannungen die Endspannungen, und für sie gilt dann eben dasselbe, was wir vorhin gesagt haben. Auf

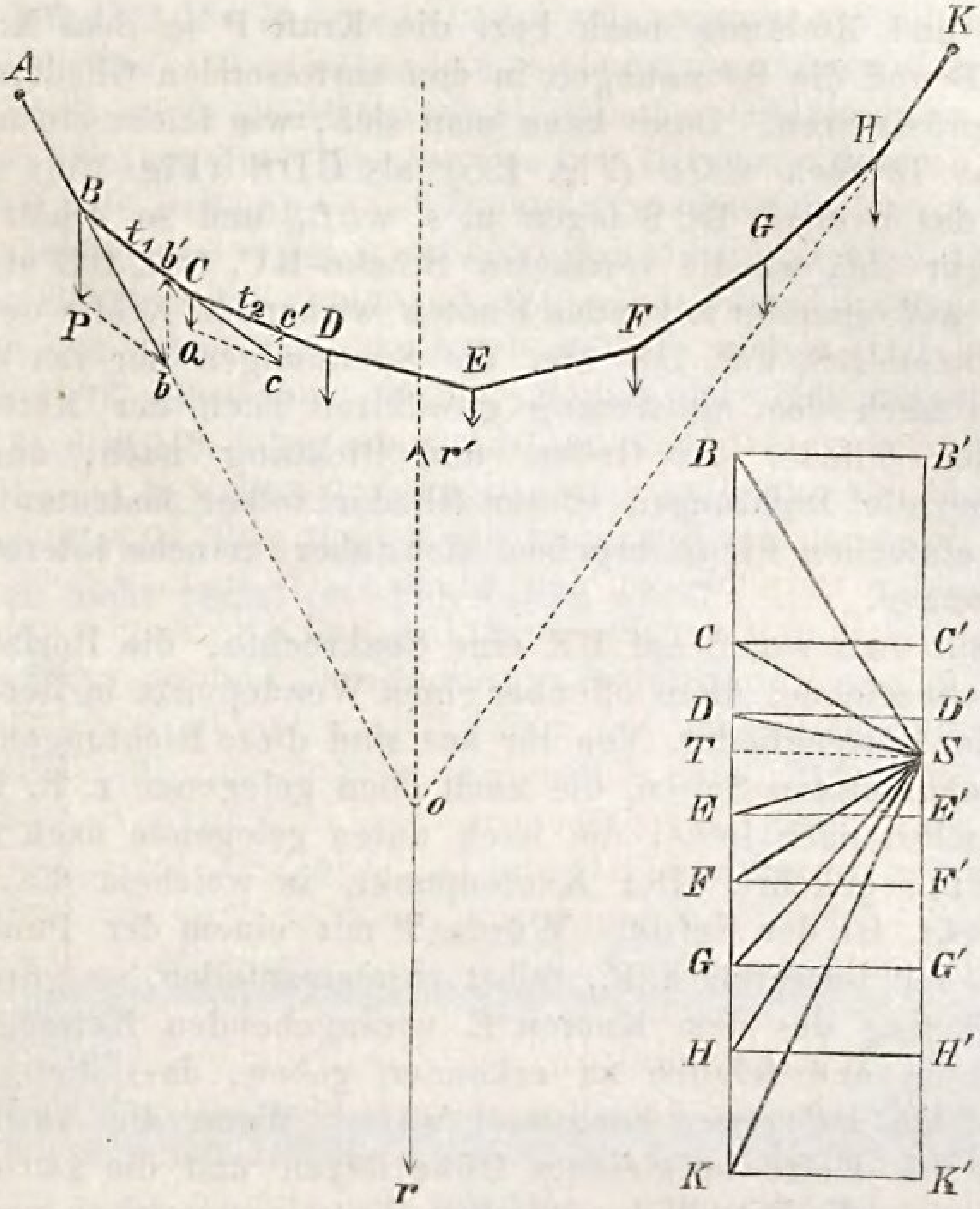


Fig. 155. Fig. 156.

diese Weise lassen sich leicht die Spannungen aller Ketten- oder Seilglieder bestimmen. Eine klarere Einsicht in das Wirken der Kräfte und Spannungen erhält man aber durch folgende Betrachtungen.

Wenn man sich in der Verlängerung des Gliedes AB das Stück Bb gleich der Spannung in AB aufträgt und aus ihm und der in dem Knoten B wirkenden Kraft P das Parallelogramm BPbb' vollendet, so stellt dessen Seite Bb' die Spannung in dem Stücke BC vor. Diese Spannung kann man in gleicher Weise, in der Verlängerung von BC als Cc auftragen und erhält dann aus ihr und aus der Kraft Q das Parallelogramm CQcc' und damit die Spannung Cc im Stücke CD u. s. w.

Man trage nun das Dreieck BPb ohne Aenderung seiner Gestalt und Lage, nur etwa im vergrösserten Maassstabe, als BCS (Fig. 156) heraus, sodass also die Seiten BC, BS, CS ihrer

Grösse und Richtung nach bez. die Kraft P in dem Knotenpunkt B und die Spannungen in den anstossenden Gliedern AB, BC repräsentiren. Dann kann man sich, wie leicht einzusehen ist, das Dreieck CQ*c* (Fig. 155) als CDS (Fig. 156) genau neben das Dreieck BCS legen u. s. w. f., und so erhält man die Figur 156, wo die vertikalen Stücke BC, CD, DE etc. die in den auf einander folgenden Knoten wirkenden Kräfte und die Seitenlinien BS, CS, DS etc. die Spannungen der von diesen Knoten nach dem als Anfang gewählten Theil der Kette hin liegenden Glieder der Grösse und Richtung nach, und daher auch die Richtungen dieser Glieder selber bedeuten. Aus dieser einfachen Figur ergeben sich aber manche interessante Folgerungen.

Fällt man von S auf BK eine Senkrechte, die Horizontale ST, so bezeichnet diese offenbar einen Wendepunkt in der Richtung der Kettenglieder. Von ihr aus sind diese Richtungen nach entgegengesetzten Seiten, die nach oben gelegenen z. B. in der Kette selbst nach links, die nach unten gelegenen nach rechts aufwärts gekehrt. Der Knotenpunkt, in welchem die Kraft EF wirkt, ist der tiefste. Würde T mit einem der Punkte D oder E, mit letzterem z. B., selbst zusammenfallen, so würde ST die Richtung des dem Knoten E vorangehenden Kettengliedes bezeichnen und folglich zu erkennen geben, dass dieses, das am tiefsten gelegene, horizontal wäre. Wenn die Aufhängepunkte der Kette in gleicher Höhe liegen und die ganze Anordnung um die Mittellinie zwischen ihnen symmetrisch vertheilt ist, so tritt der erste Fall offenbar bei einer geraden, der letzte bei einer ungeraden Anzahl der Kettenglieder ein. Der Punkt S liegt dann selbst senkrecht über der Mitte der Linie BK und die Fig. 156 ist zu beiden Seiten der Linie ST symmetrisch.

Man zerlegt die Spannungen in den einzelnen Seil- oder Kettengliedern sehr häufig in zwei Componenten, in eine horizontale und in eine vertikale, die man auch kurz mit Horizontal- und Vertikalspannung des betreffenden Gliedes bezeichnet. Diese beiden Componenten erhält man in unserer Fig. 156 auf's Einfachste, wenn man die Linie B′K′ durch S parallel zu BK und die Linien BB′, CC′, DD′ u. s. w. parallel zu ST zieht. BB′ ist dann z. B. die Horizontal-, SB′ die Vertikalspannung von der Totalspannung BS des ersten Kettengliedes, wie man sofort sieht, wenn man bedenkt, dass BS die Diagonale des Parallelogramms BTSB′ ist. Ebenso sind CC′ und SC′ die Horizontal- und Vertikalspannungen des 2. Kettengliedes u. s. w. Hieraus

folgt sofort: **Alle Horizontalspannungen sind einander gleich. Der Unterschied zwischen den Vertikalspannungen irgend zweier Glieder, die auf der nämlichen Seite der Kette, vom tiefsten Punkte derselben aus gerechnet, liegen, ist gleich der Summe der zwischen ihnen liegenden vertikalen Kräfte.** Wenn die Zahl der Glieder, bei symmetrischer Anordnung, ungerade und daher das unterste, mittlere, horizontal ist, so bezeichnet ST selbst seine Horizontalspannung. Die Vertikalspannung in demselben ist, wie natürlich, Null.

Ihre vorzüglichste Anwendung finden die obigen Betrachtungen bei den **Kettenbrücken**. Bei denselben ist an zwei, häufig auch an mehr genau gleichen Ketten *abcd* (Fig. 157)

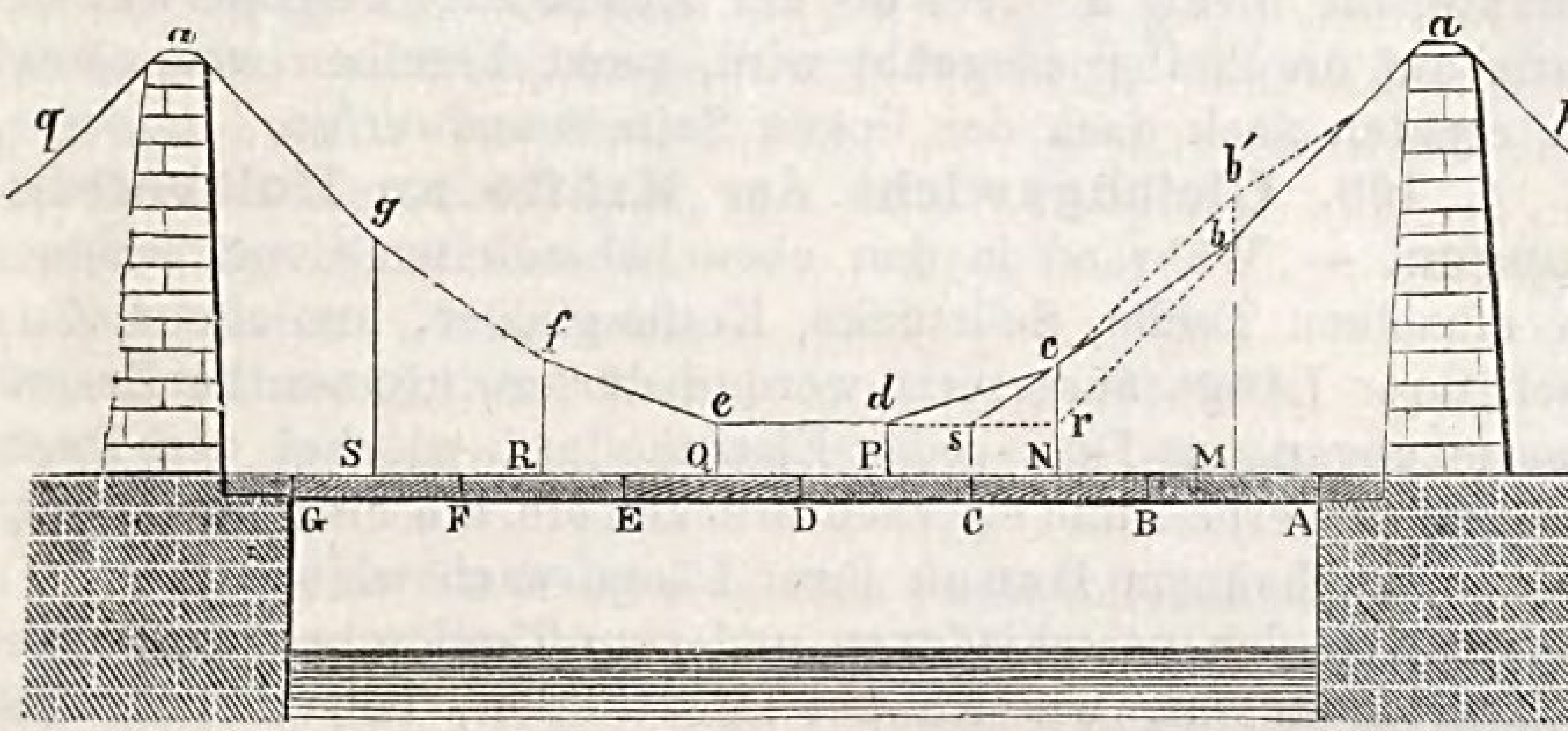


Fig. 157.

mittelst der vertikal herabhängenden Stangen M, N, P, Q die Brückenbahn aufgehängt. An den Aufhängestangen hat man sich die Kräfte vertikal abwärts wirkend zu denken, und zwar bestehen dieselben ausser dem Gewichte dieser Stangen selbst noch aus dem halben Gewicht jeder der beiden an dem Aufhängepunkt der Stange zusammenstossenden Kettenglieder und aus dem Gewichte des Theils der Brückenbahn, welcher von der nächstvorhergehenden bis zur nächstfolgenden Mitte zwischen je zwei Stangen reicht. Denn offenbar muss die Construction der Art sein, dass die Brückenbahn, auch nachdem man sie in jenen Mitten A, B, C durchschnitten, gerade und horizontal bleibt, was nur der Fall ist, wenn auf jede Aufhängestange nur jenes Gewicht und sonst keine durch Mängel der Construction hervorgerufene, schädliche Spannungen treffen. Die hiedurch bedingte Form der Kette und Länge der Stangen kann aus den obigen Auseinandersetzungen leicht bestimmt werden,

und die übrigen Constructionen in Fig. 157 sind nun auch von selbst klar, wenn man berücksichtigt, dass die Vertikale cN in der Mitte zwischen D und A und die sC in der Mitte zwischen D und B liegt.

Was die Verlängerungen der Kette über die Befestigungspunkte a hinaus, ap und aq, betrifft, so gibt man ihnen dieselbe Neigung wie den Gliedern ab und ah. Ist die Kette einfach auf den obersten Theil a der Pfeiler gelegt und kann über dieselben nach der einen oder andern Seite hin ungehindert abgleiten, so müssen die Spannungen der Glieder ab und ap, sowie ag und aq als gleichgross angenommen werden. Die Resultante dieser beiden Spannungen ist also vertikal gerichtet, wenn ab und ap, sowie ag und aq gleiche Neigung haben, und diese Resultante, die nichts anderes als der Druck ist, welcher von der Kette auf die Pfeiler ausgeübt wird, sucht dieselben weder nach der rechten noch nach der linken Seite umzuwerfen.

§. 100. **Gleichgewicht der Kräfte an Holzverbindungen.** — Während in den oben behandelten Constructionen die einzelnen Theile, Seilstücke, Kettenglieder, nur einem Zug nach ihrer Länge ausgesetzt werden dürfen, können bei Zusammensetzungen aus Holz- oder Eisentheilen, wie bei den Dachstühlen, hölzernen und eisernen Brücken etc. die einzelnen Theile, Balken, auch einem Druck ihrer Länge nach widerstehen. Wir können von den verschiedenen und zum Theil sehr complicirten Holzverbindungen, wie sie bei Dachstühlen, beim Brückenbau u. s. w. angewendet werden, hier natürlich nur die allereinfachsten zur Sprache bringen. Es werden dieselben jedoch immerhin die nöthigen Anhaltspunkte zur Betrachtung zusammengesetzterer Verbindungen gewähren können.

Betrachten wir zunächst das Gleichgewicht eines Balkens AB (Fig. 158), der sich an eine vertikale Wand lehnt. Auf denselben wirke keine andere Kraft, als sein Gewicht CQ, das wir uns in seinem Schwerpunkt C, d. h. in der Mitte zwischen A und B, angebracht denken müssen. Diese Kraft kann in zwei vertikale Seitenkräfte AD und BE zerlegt werden, die in den Endpunkten des Balkens angreifen, und von denen jede gleich dem halben Gewicht desselben ist. Die Kraft BE kann wiederum in zwei Seitenkräfte zerlegt werden, von denen die eine, B G, senkrecht gegen die Wand wirkt und durch den Widerstand derselben aufgehoben wird, während die andere BF, in der Richtung des Balkens wirkend, in dieser Richtung einen Druck in A ausübt, den wir durch die Linie A K gleich BF vorstellen wollen.

Der in A ausgeübte schiefe Druck kann aber wieder in eine vertikal abwärts wirkende Seitenkraft AD und in eine horizontale AM zerlegt werden. Die erstere vereinigt sich mit der schon in A wirkenden, unmittelbar von dem Gewicht CQ herrührenden vertikalen Kraft AD zu einem Gesammtdruck AL, der doppelt so gross als AD, also gleich dem Gewichte CQ ist und von dem Widerstand des Bodens aufgehoben wird. In Folge der horizontalen Kraft AM, welche der Horizontalschub heisst, sucht der Balken abzurutschen und thut dies in der That, wenn ihm nicht Hindernisse in dem Weg stehen.

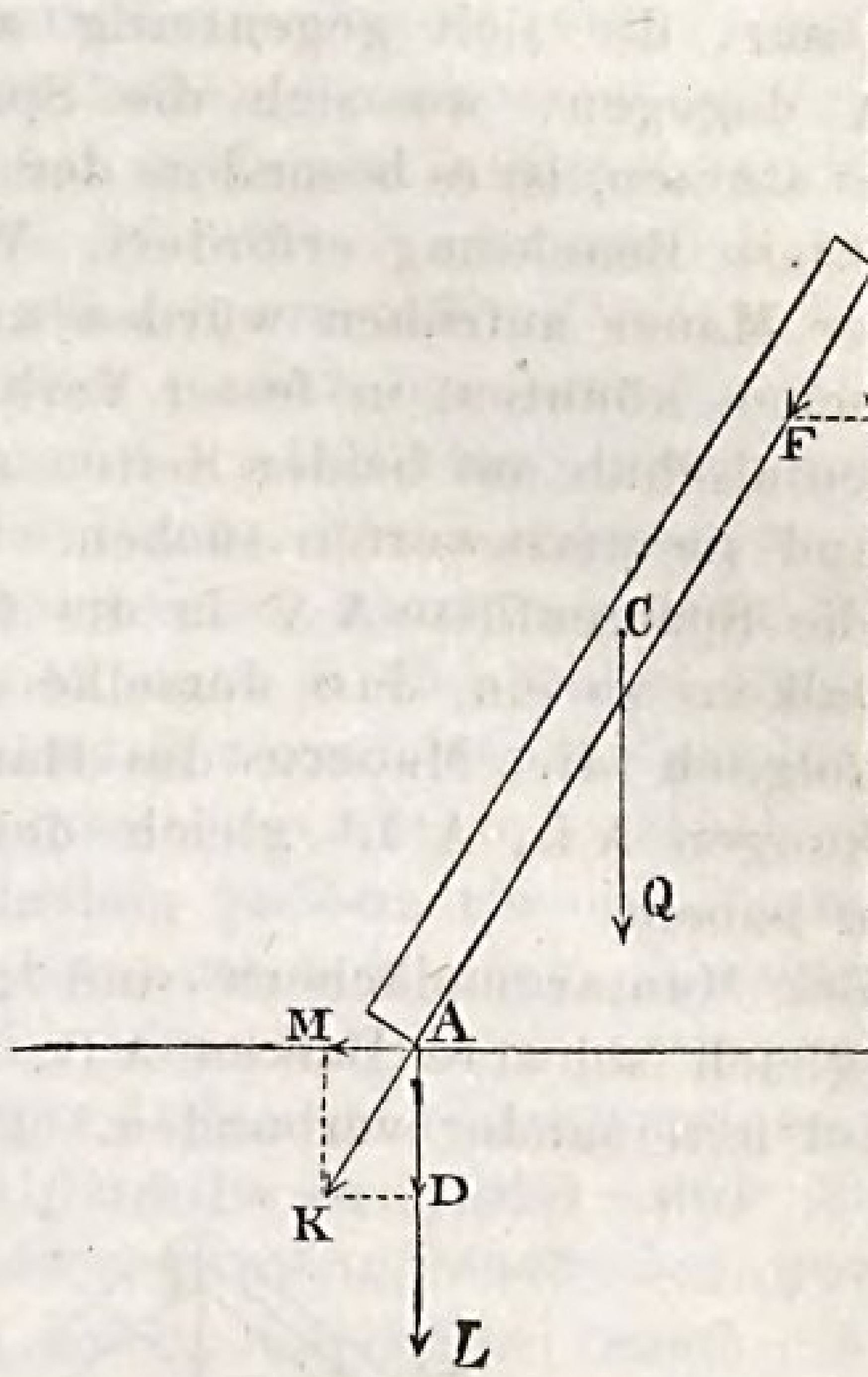


Fig. 158.

Wenn sich der Balken in dem Punkte B statt an eine vertikale Wand an einen zweiten gleich grossen und gleich geneigten Balken A'B (Fig. 159) stützt, so bleibt offenbar die Vertheilung der Kräfte an ihm ganz dieselbe und für den andern Balken A'B findet eine ganz ähnliche Zerlegung der Kräfte statt. Zwei so verbundene Balken, Sparren genannt, bilden die einfachste Construction eines Dachstuhls. In ihrem Zusammenstossungspunkt B üben sie zwei gleich grosse und entgegengesetzt gerichtete Kräfte BG, BG' gegenein-

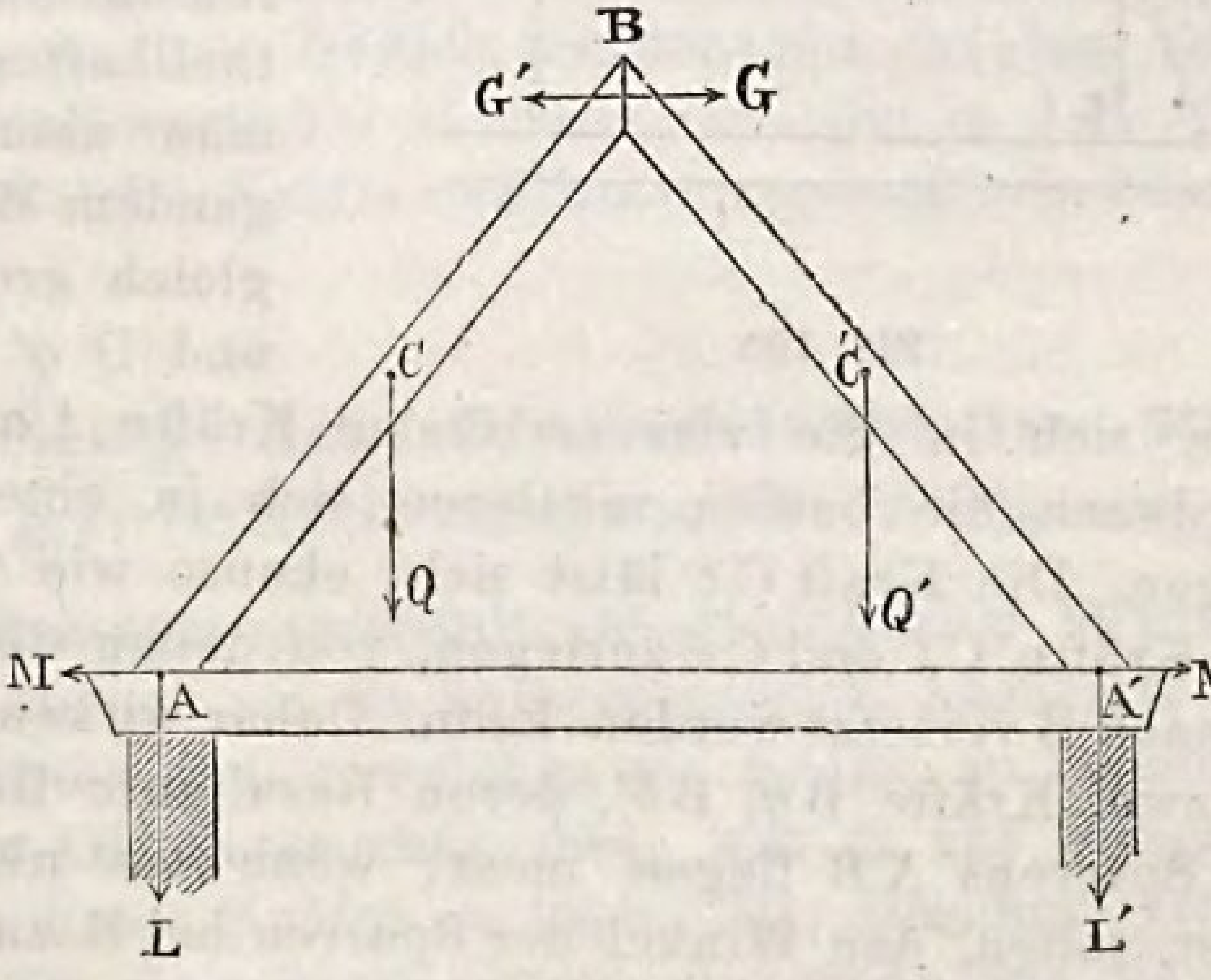


Fig. 159.

ander aus, die sich gegenseitig aufheben. In den Punkten A und A' dagegen, wo sich die Sparren gegen die Mauern des Hauses stützen, ist es besonders der Horizontalschub AM und A'M', der unsere Beachtung erfordert. Wenn die Sparren unmittelbar auf der Mauer aufruhen würden und mit dieser, damit sie nicht abrutschen könnten, in fester Verbindung stünden, so würde der Horizontalschub auf beiden Seiten auf die Mauer übertragen werden und sie umzuwerfen suchen. Um dies zu verhindern, fügt man die Sparrenfüsse A A' in die Enden eines horizontal liegenden Balkens so ein, dass derselbe den Horizontalschub aufnimmt und folglich die Mauern des Hauses nur noch die vertikalen Drückungen A L, A'L' gleich den Gewichten der Sparren zu tragen haben.

Bei Mansardendächern sind gewöhnlich zwei gleich grosse und gleich schwere Balken A B, B C (Fig. 160) unter einem Winkel miteinander verbunden. Dieser Winkel ist an und für sich beliebig; die vortheilhafteste Neigung werden aber die beiden Sparren offenbar dann zu einander haben, wenn die in dem Punkte B wirksamen Kräfte kein Bestreben haben, diesen Winkel zu verändern, denn dann braucht in dem Punkte B nur eine schwache Verbindung der beiden Sparren stattzuhaben. Diesen vortheilhaftesten Winkel findet man aber leicht auf folgendem Wege: Die beiden, gleich grossen Gewichte D q und D' q' der Sparren zerlegen sich in die vier vertikalen Kräfte A a, B b, $b b'$ und C c, von denen die beiden mittleren sich in eine einzige B b' vereinigen. Die Kraft C c lässt sich, ebenso wie vorhin, in die beiden Kräfte C f und C e zerlegen, von denen die erstere als Kraft B g nach B versetzt werden kann. Daher wirken in dem Punkte B die zwei Kräfte B g, B b', deren Resultante B h in der Richtung des Sparrens A B liegen muss, wenn sie nicht das Bestreben haben sollen, den Winkel der Sparren bei B zu ändern. Nun ist, wenn man $b g$ zieht, das Dreieck B $b g$ dasselbe, wie das Dreieck C $c f$.

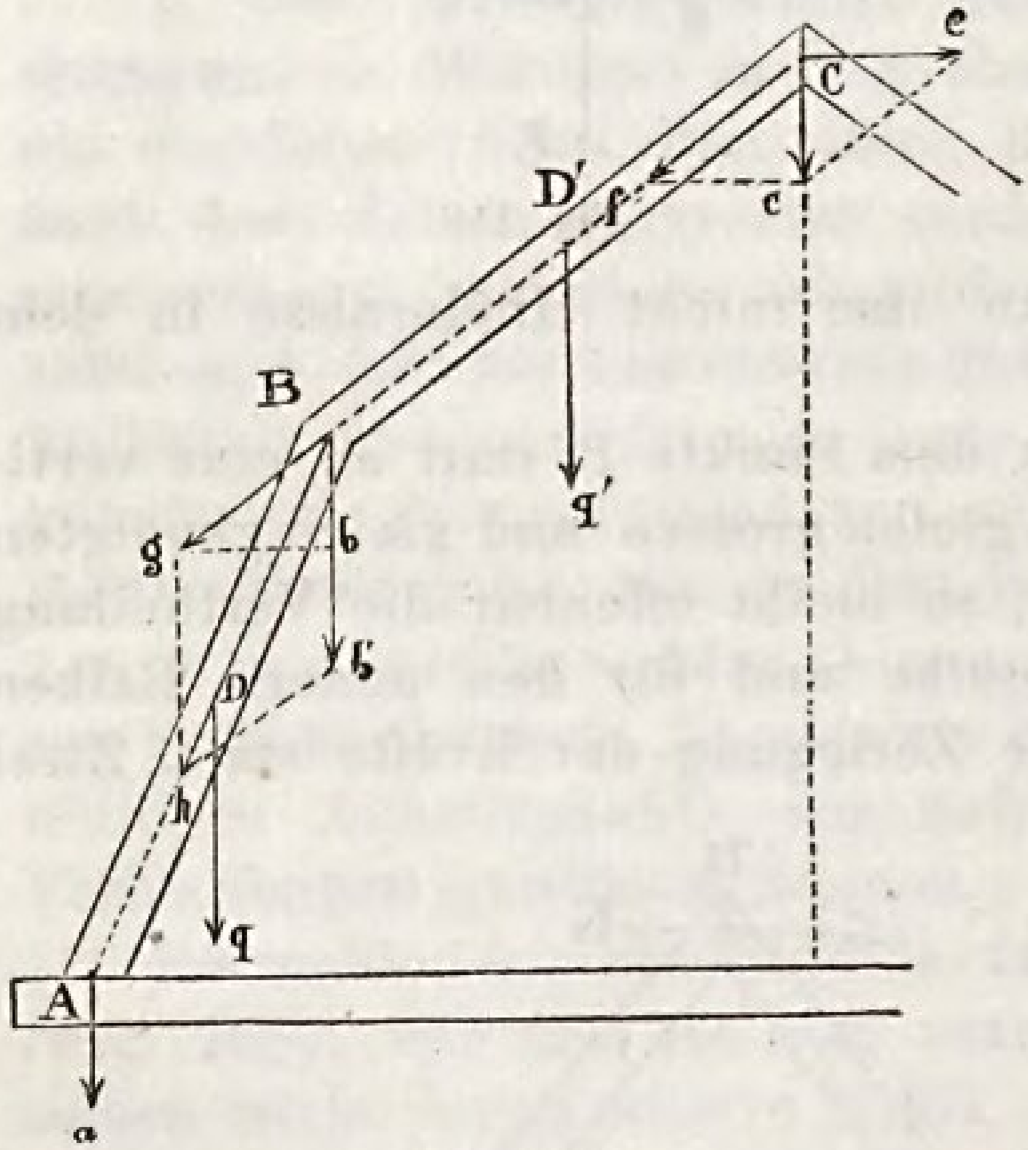


Fig. 160.

Wenn man daher ein rechtwinkliges Dreieck Bbg construirt, dessen eine Kathete gleich dem halben Gewichte eines der beiden Sparren, und dessen Winkel gBb gleich dem festgesetzten oder beliebigen Neigungswinkel des oberen Sparrens gegen die Vertikale ist; wenn man hierauf Bb um sich selbst bis b' verlängert und über Bg und Bb' das Parallelogramm Bghb' construirt, so ist der Winkel, welchen die rückwärtige Verlängerung von Bg mit der Diagonale Bh dieses Parallelogramms bildet, der gesuchte Neigungswinkel der beiden Sparren. — Die Mittelkraft Bh überträgt sich natürlich nach A und bringt dort noch einen vertikalen Druck und einen Horizontalschub hervor.

Wie zusammengesetzt übrigens eine solche Verbindung von geradlinigen Holz- oder Eisentheilen, Balken, also ein Dachstuhl, eine hölzerne oder eiserne Brücke auch sein mag, die ursprünglichen Bedingungen für ihr Gleichgewicht sind nicht schwer aufzustellen: Denkt man sich irgend einen der Constructionstheile oder Balken heraus, so erfährt derselbe an jedem seiner Enden von den dort anstossenden andern Constructionstheilen gewisse Einwirkungen, die sich durch Kräfte darstellen lassen. Wenn der Balken im Gleichgewicht sein soll, so müssen es also diese sämmtlichen Kräfte mit Einschluss der sonst noch auf ihn wirkenden, wie z. B. seines eigenen Gewichtes, für sich sein, oder ihre Resultante muss Null werden. Denkt man sich ferner in irgend einem der Zusammenstossungspunkte mehrerer Balken die Kräfte, welche an den hier liegenden Endpunkten derselben wirken, so müssen diese offenbar nach dem Princip der gleichen Wirkung und Gegenwirkung ebenfalls unter sich im freien Gleichgewicht sein oder die Resultante Null haben. — Diese beiden Grundbedingungen reichen aus, um, freilich meistens nur auf dem Wege langwieriger und beschwerlicher Rechnungen, die in dem Constructionssystem wirkenden Kräfte und Spannungen einzeln kennen zu lernen.

V. Betrachtung der Maschinen im Zustande der gleichförmigen Bewegung.

§. 101. **Die Bewegungsarbeit ist gleich der Widerstandsarbeit.** — Indem wir im vorhergehenden Abschnitt die Bedingungen aufsuchten, unter welchen die Kräfte an verschiedenen Maschinen im Gleichgewichte sind, war es uns lediglich um das Verhältniss dieser Kräfte zu thun. Die Maschine selbst setzten wir dabei meist als ruhend voraus, und wenn wir die für

diesen Zustand gewonnenen Resultate unmittelbar auf die Praxis übertrugen, wo die vorhandenen Widerstände durch die Kräfte überwunden und also Bewegungen erzielt werden sollen, da dachten wir uns eben den Uebergang so, dass, wenn einmal Gleichgewicht für den Zustand der Ruhe vorhanden ist, die Bewegung schon durch die allergeringste Vergrösserung der bewegenden Kraft hervorgebracht wird. — Es reicht diese Betrachtungsweise, wie gezeigt, vollständig aus, wo es sich blos darum handelt, die Art und Weise wie sich die Kräfte in einer Maschine fortpflanzen, die Aenderungen, welche sie dabei erfahren, zu ermitteln. Aber durch ihre Anwendung allein würde man nur eine sehr unvollkommene Einsicht in die Wirkungsweise der Maschinen erhalten; ja, ausschliesslich gebraucht, könnte sie zu sehr bedeutenden Irrthümern führen, indem man dadurch veranlasst werden könnte, den Maschinen Eigenschaften zuzuschreiben, welche sie in Wirklichkeit nicht besitzen. Und hierin liegt eben der Fehler, in welchen alle diejenigen verfallen, welche das sog. Perpetuum mobile, von dem wir weiter unten näher sprechen werden, suchen. Es haben diese Leute gewöhnlich einige Begriffe über das Gleichgewicht der Kräfte an Maschinen für den Fall der Ruhe; aber es fehlt ihnen die richtige Einsicht in die Wirkungsweise dieser Kräfte für den Fall, wo die Maschine in Bewegung ist.

Wenn aber die Maschine, an welcher beliebige Kräfte wirken, in Bewegung ist und somit auch die Angriffspunkte jener Kräfte, so leistet jede derselben eine gewisse Arbeit (§. 26). Die Grösse dieser Arbeit haben wir in den §§. 27 bis 39 für die einfachsten Fälle sowohl, wie für den allgemeinsten bestimmen gelernt. In §. 38 haben wir ausserdem zwischen bewegenden und widerstehenden Kräften, zwischen Bewegungsarbeit und Widerstandsarbeit unterschieden.

Wenn nun eine Anzahl von Kräften an einer irgendwie bewegten Maschine oder an einem Körper im Gleichgewicht sind, so muss die gesammte Arbeit der bewegenden unter ihnen in einer bestimmten Zeit gleich sein der von den widerstehenden unter jenen Kräften in derselben Zeit geleisteten Widerstandsarbeit. Oder auch:

In dem Falle, wo die Bewegung der Maschine oder des Körpers mit gleichförmiger Geschwindigkeit vor sich geht, muss die in irgend einer Zeit von den bewegenden Kräften geleistete Bewegungsarbeit

gleich sein der in derselben Zeit von den widerstehenden gethanen Widerstandsarbeit.

Dieser Satz, gewöhnlich das Princip der virtuellen Geschwindigkeiten genannt, ist von der grössten Wichtigkeit: denn erstens können aus ihm alle für das Gleichgewicht der Körper geltenden Sätze, d. h. die gesammten Lehren der Statik abgeleitet werden, wie das auch *Lagrange* in seinem berühmten Werke „*Mécanique analytique*" gethan hat; und zweitens ist gerade der Zustand der gleichförmigen oder wenigstens der gleichförmig periodischen Bewegung derjenige, welcher in der angewandten Mechanik, bei Maschinen, am häufigsten vorkommt. Zudem ist die Anwendung jenes Satzes, wie wir später an mehreren Beispielen zeigen werden, eine ebenso leichte als sichere. Zuvor jedoch wollen wir uns Ueberzeugung von seiner Richtigkeit zu verschaffen suchen. Wir gehen dabei von einigen einfachen, bereits im vorigen Abschnitt behandelten Fällen aus, um von ihnen zu complicirteren und endlich zu dem allgemeinsten zu gelangen.

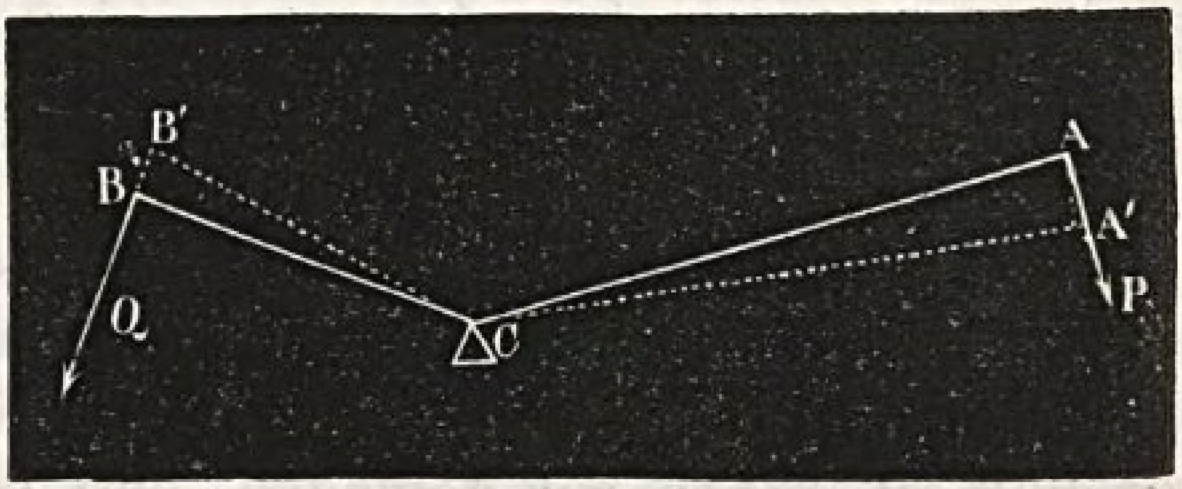


Fig. 161.

§. 102. Wenn der Winkelhebel BCA (Fig. 161) unter dem Einfluss der beiden, senkrecht auf seine Arme CA, CB wirkenden Kräfte P und Q im Gleichgewicht sein soll, so müssen sich diese umgekehrt, wie ihre Hebelarme CA, CB verhalten. Denken wir uns nun den Hebel in Bewegung und fassen ein Stück dieser Bewegung, etwa das von BCA nach B'CA' auf, das so klein ist, dass die Wege AA' und BB' der Angriffspunkte, die in Wirklichkeit Kreisbögen sind, als gerade und zusammenfallend mit den Richtungen AP und BQ der Kräfte betrachtet werden können. Dann ist sofort klar, dass sich diese Wege verhalten wie die Hebelarme AC und BC, die Radien der Kreise, mit denen sie beschrieben sind. Daher sind auch die Kräfte diesen kleinen Wegstückchen ihrer Angriffspunkte umgekehrt proportional: wenn z. B. die Kraft P doppelt so klein als die Kraft Q ist, so ist AA' doppelt so gross als BB', oder die Produkte, der Kräfte in die kleinen Wege ihrer Angriffspunkte, die in ihrer Richtung zurückgelegt wurden, sind einander gleich. Diese Produkte sind aber nichts anderes, als die Arbeit der Kräfte während der betrachteten kleinen Bewegung. Und wenn man auf gleiche Weise

die Kräfte durch irgend eine grössere Bewegung hindurch verfolgt und die geleisteten Arbeiten summirt, so sieht man, dass in der That die gesammte Bewegungsarbeit der Kraft P gleich der in derselben Zeit geleisteten Widerstandsarbeit der Kraft Q ist.

Bei der losen Rolle mit parallelen Seiltheilen (Fig. 110, S. 139) ist die Zugkraft, welche an dem Seil wirken muss, nur halb so gross als das Gewicht, welchem sie das Gleichgewicht zu halten hat. Dagegen sieht man aber auch, dass, um das Gewicht um eine bestimmte Strecke zu heben, der Angriffspunkt der Zugkraft um das Doppelte in die Höhe steigen muss. Die Arbeit der bewegenden Kraft ist also wiederum gleich der Widerstandsarbeit der Last.

Bei dem in Fig. 112 (S. 140) abgebildeten Flaschenzug ist die an dem Seile wirkende Zugkraft nur der sechste Theil des zu hebenden Gewichtes. Aber damit dieses Gewicht um einen Decimeter z. B. in die Höhe steigt, muss die Länge jedes Schnurtheils, welcher die obere Flasche mit der untern verbindet, um einen Decimeter vermindert werden, und da die ganze Länge des Seils dieselbe bleibt, so ist klar, dass der Angriffspunkt der am freien Ende desselben wirkenden Kraft um sechs Decimeter abwärts gehen muss. Wenn also auch die aufgewendete Kraft sechsmal kleiner als die zu überwindende Last ist, so beschreibt andererseits der Angriffspunkt dieser Last nur den sechsten Theil des Wegs, den die Kraft zu durchlaufen hat.

Bei der Wagenwinde, welche in Fig. 128 (Seite 157) dargestellt ist, haben wir gefunden, dass die Kraft, welche auf die Kurbel wirkt, nur der fünfzehnte Theil des zu überwindenden Widerstands ist. Sehen wir nun, in welchem Verhältniss die Wege stehen, welche von den Angriffspunkten dieser beiden Kräfte zurückgelegt werden. Während das Trieb C eine ganze Umdrehung macht, dreht sich das Rad B gleichfalls einmal herum; das Trieb D aber, welches in letzteres eingreift und dreimal weniger Zähne hat, macht in derselben Zeit drei Umdrehungen. Um also das Trieb C einmal herumzudrehen und damit die Zahnstange um ein Stück fortzubewegen, das gleich dem Umfang dieses Triebs ist, muss die Kurbel dreimal herumgedreht werden; wenn man nun noch beachtet, dass der Arm der Kurbel fünfmal so gross als der Halbmesser des Triebs C ist, und folglich der Umfang des Kreises, welchen der Angriffspunkt der Kraft beschreibt, das fünffache des Umfangs jenes Triebs, so erkennt man leicht, dass in der That die an der Kurbel wirkende Kraft einen fünfzehnmal so grossen Weg durchläuft als der Widerstand, welchen die Zahnstange überwindet.

Bei dem Hebebock (Fig. 131, S. 161) haben wir gesehen, dass eine Kraft, die auf eine der Kurbeln wirkt, 20 Kilogramm betragen muss, um ein Gewicht von 1200 Kilogramm zu heben. Die Kraft ist also sechzigmal so klein als die Last. Während die Haspelwelle eine ganze Umdrehung macht, muss die Kurbel zehn Umdrehungen machen, weil das an der Kurbelachse sitzende Trieb zehnmal weniger Zähne hat als das Zahnrad an der Haspelwelle. Da ferner der Arm der Kurbel dreimal so gross als der Halbmesser der Haspelwelle ist, so ist die Peripherie, welche der Angriffspunkt der Kraft beschreibt, dreimal so gross als der Umfang der Haspelwelle; während sich also das Seil um eine Länge gleich diesem letzteren Umfang auf der Haspelwelle aufwickelt, durchläuft der Angriffspunkt der Kraft an der Kurbel einen dreissigmal so grossen Weg. Nun ist aber die Höhe, um welche sich das an der losen Rolle befestigte Gewicht erhebt, nur die Hälfte der Länge, um welche sich das Seil auf der Haspelwelle aufwickelt; wenn also einerseits die Kraft sechzigmal so klein als der zu überwindende Widerstand ist, so ist andererseits der Weg, welchen sie zurückzulegen hat, sechzigmal so gross als der Weg, welchen auf ihre Veranlassung die Last durchläuft.

§. **103.** In den Beispielen, welche wir bisher durchgenommen haben, bewegen sich die Angriffspunkte der Kräfte immer in der Richtung dieser Kräfte, entweder in dem nämlichen oder im entgegengesetzten Sinne. Dies ist der Fall, wenn sich die Hand, welche an einem Seil zieht, in der Richtung des Seils fortbewegt; die Kraft, welche an einer Kurbel wirkt, hat beständig die Richtung der Tangente an den Kreis, welchen diese Kurbel beschreibt; der Körper, welcher mit Hülfe des Flaschenzugs oder Hebebocks empor gezogen wird, bewegt sich vertikal in die Höhe, also im entgegengesetzten Sinne der Richtung seines Gewichts. Wenn aber die Richtung der Kraft nicht mehr mit der des Weges, welchen ihr Angriffspunkt durchläuft, zusammenfällt, wenn sie einen spitzen oder stumpfen Winkel damit bildet, so wissen wir aus §. 37, dass man die Kraft mit dem in ihrer Richtung durchlaufenen Weg oder mit der Projection des wirklichen Weges auf die Kraft zu multipliciren hat, um ihre Arbeit zu erhalten. Dies ist natürlich auch bei dem Satze, von dem wir gegenwärtig sprechen, zu berücksichtigen.

Wenn ein schwerer Körper eine schiefe Ebene hinaufgezogen wird, indem eine Zugkraft Q parallel zur schiefen Ebene (Fig. 162) auf ihn wirkt, so bewegt sich wohl der Angriffspunkt D dieser

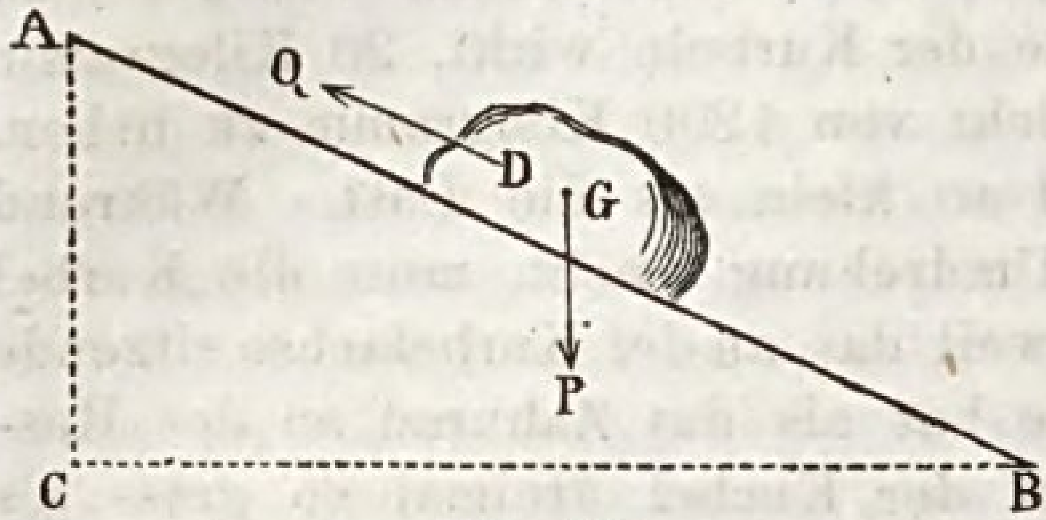


Fig. 162.

Kraft in der Richtung derselben, aber der Schwerpunkt G, an welchem die vertikale Kraft P, gleich dem Gewicht des Körpers, angebracht ist, bewegt sich nicht in der Richtung der Vertikalen. Die von den Angriffspunkten D und G der beiden Kräfte durchlaufenen Wege sind dieselben, aber die Kräfte P und Q sind für den Fall des Gleichgewichts oder der gleichförmigen Bewegung nicht gleich, sie verhalten sich wie die Höhe AC der schiefen Ebene zu ihrer Länge AB. Wenn aber der Körper auf der schiefen Ebene von B bis A fortgeschritten ist, so hat er sich in vertikaler Richtung um die Höhe AC erhoben; nun ist diese Höhe der Weg, welchen der Angriffspunkt der Kraft P in der Richtung dieser Kraft durchläuft; und wenn man denselben mit der Länge AB vergleicht, welche in derselben Zeit von dem Angriffspunkt der Kraft Q zurückgelegt wird, so sieht man leicht, dass die Kraft Q, wenn sie auf der einen Seite die Hälfte, den dritten, vierten Theil des Gewichtes P beträgt, andererseits den doppelten, dreifachen, vierfachen Weg als der Angriffspunkt der Kraft P zurücklegen muss, d. h. einen Weg, der doppelt, dreimal, viermal so gross ist als die Höhe, um welche sich der Körper erhebt, indem er auf der schiefen Ebene emporsteigt.

Damit ein Hebel ACB (Fig. 163), auf welchen Kräfte P und Q in beliebigen Richtungen wirken, im Gleichgewicht sei, müssen sich diese Kräfte wieder umgekehrt wie ihre Hebelarme, d. h. wie die Linien Ca und Cb verhalten, welche von dem Drehungspunkt C aus senkrecht auf ihre Richtungen gezogen sind. Wenn nun der Hebel um

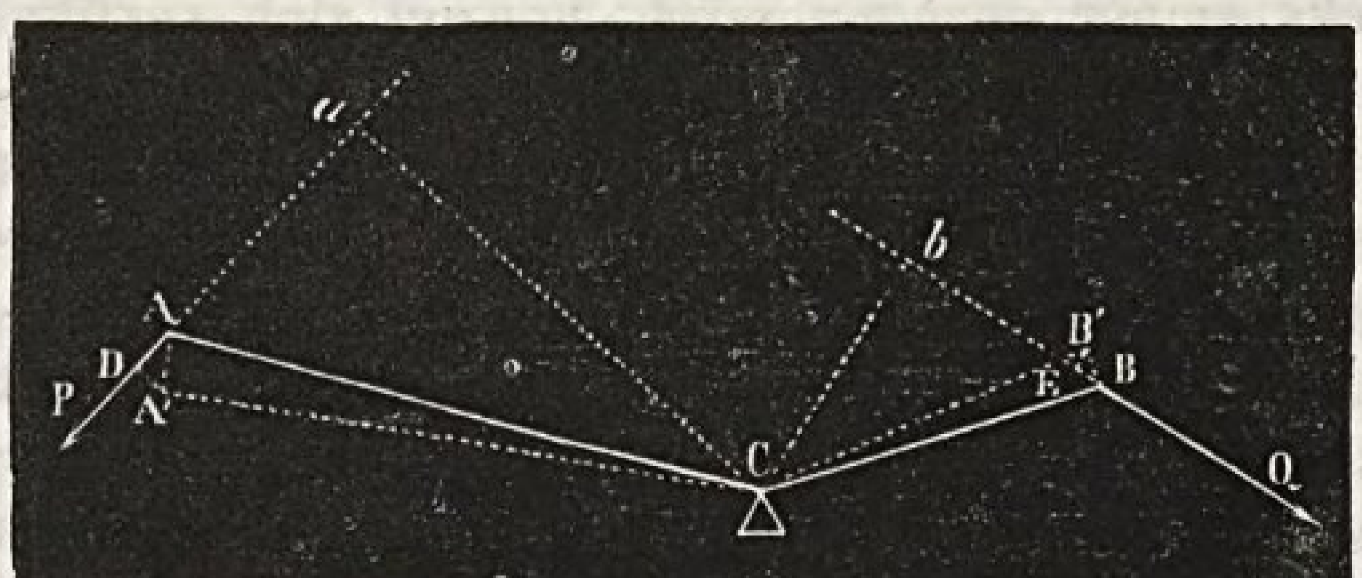


Fig. 163.

seinen Drehungspunkt von ACB nach A′CB′ etwas, nur so wenig gedreht wird, dass die von den Angriffspunkten A und B beschriebenen Wege AA′ und BB′ als gerade betrachtet wer-

den können, so sind die Stücke AD, BE, welche man erhält, wenn man von A', B' Senkrechte A'D, B'E auf die Richtungen der Kräfte P und Q fällt, die in diesen Richtungen durchlaufenen Wege der Angriffspunkte. Nun sieht man leicht, dass die Dreiecke A'DA und ACa, sowie B'EB und BCb von gleicher Gestalt, ähnlich sind, und dass folglich das Verhältniss der Seiten AD und Ca dasselbe wie das der Seiten AA' und CA, sowie auch das Verhältniss der Seiten BE und Cb dasselbe wie das von BB' und CB ist. Aber die Verhältnisse der Seiten AA' und CA, BB' und CB sind wegen des gleichen Winkels, um den die beiden Arme AC und BC sich drehen, gleich; desshalb sind es also auch die der Seiten AD und Ca', sowie BE und Cb. Sowie daher die Kräfte P und Q ihren Hebelarmen Ca und Cb umgekehrt proportionirt sind, so sind sie es auch den in ihren Richtungen durchlaufenen Wegstückchen AD und BE oder die Producte aus den Kräften in die in ihrer Richtung durchlaufenen Wegstückchen, ihre Arbeiten, sind wieder von gleicher Grösse. Im Falle einer grösseren Bewegung des Hebels darf man diese nur wieder in lauter so kleine Stückchen wie die oben betrachteten zerlegen und die einzelnen Resultate addiren, um den Satz des §. 101 auch hiefür bestätigt zu finden.

§. **104.** Jede Maschine, wie zusammengesetzt sie auch sei, besteht immer nur aus einer Wiederholung der zwei einzigen, im Wesen verschiedenen einfachen Maschinen, die es gibt, des Hebels und der schiefen Ebene, natürlich in den verschiedenen Formen, als Hebel schlechtweg oder als Zahnräder, Riemenrollen, als Schrauben, Keile etc., in welchen dieselben vorkommen können. Alle zusammengesetzten Maschinen, welche wir bisher betrachtet haben, werden diese Behauptung zur Genüge bestätigen. Wenn wir uns nun in den beiden vorhergehenden Paragraphen überzeugt haben, dass unser Satz von jenen beiden einfachen Maschinen gilt, so ist nicht mehr schwer, einzusehen, dass er auch für jede zusammengesetzte Maschine richtig sein muss, wie wir ja das für einzelne Fälle schon in §. 102 direct nachgewiesen haben. — Um übrigens jeden Zweifel zu beseitigen und die völlige Allgemeinheit unseres Satzes darzuthun, stellen wir folgende Betrachtung an.

Wir denken uns einen Körper, auf den irgend eine Anzahl beliebiger Kräfte einwirkt. Dabei kann der Körper ganz frei sein, oder einen festen Punkt, oder eine feste Achse haben, oder sich gegen eine feste Ebene stützen (vgl. §. 58). Die an ihm wir-

kenden Kräfte denken wir uns so angebracht, dass an jedem Angriffspunkt einer solchen die lose Flasche eines Flaschenzugs befestigt ist, während die zugehörige feste Flasche in der Richtung der Kraft in einem beliebigen ausserhalb des Körpers gelegenen festen Punkt angemacht wird. Die Anzahl der Rollen in diesen Flaschenzügen nehmen wir der Grösse der bezüglichen Kräfte proportional, sodass wir an dem freien Seilende eines jeden derselben die nämliche Kraft thätig sein lassen können. Nehmen wir als solche dann die Einheit der Kräfte oder, wenn es nothwendig ist, einen passenden Bruchtheil derselben, so kann offenbar jede der durch einen Flaschenzug ersetzten Kräfte ihrer Grösse nach durch die Zahl der Rollen in dem betreffenden Flaschenzug ausgedrückt werden (vgl. §. 79).

Da aber an dem freien Seilende jedes Flaschenzugs die nämliche Kraft thätig ist, so haben nicht blos alle Seiltheile eines und desselben Flaschenzugs, sondern die aller Flaschenzüge die gleiche Spannung, gleich der Krafteinheit. Desshalb können wir uns ein einziges Seil um alle Flaschenzüge geschlungen denken, das von einem zum andern durch passend angebrachte Leitrollen in die gehörigen Richtungen gebracht wird. Der Anfang dieses Seils ist an der festen Flasche irgend eines als ersten genommenen Flaschenzugs in gewöhnlicher Weise festgeknüpft; an seinem Ende wirke die Krafteinheit als Zug und erzeuge dadurch eben die ursprünglich gegebenen Kräfte. Wenn diese nicht im Gleichgewicht sind, so wird durch diesen Zug eine Bewegung des Körpers veranlasst und die dabei gethane Arbeit, welche die Krafteinheit am Ende des Seils leistet, wird also durch die Zahl ausgedrückt, welche den Weg oder die Verlängerung des Seils angibt. Setzen wir die Bewegung als so gering voraus, dass die Richtungen der durch die Flaschenzüge repräsentirten Kräfte nicht erheblich geändert werden, so ist die Arbeit, welche jede der einzelnen Kräfte dabei leistet, gleich dem Product aus ihr in den in ihrer Richtung gemachten Weg des Angriffspunkts, welcher Weg offenbar gleich ist der Grösse, um welche sich beide Flaschen des Flaschenzuges genähert oder von einander entfernt haben. Da aber die Kraft durch eine Zahl gleich der Anzahl der Rollen des Flaschenzugs ausgedrückt wird, so ist jenes Product offenbar gleich der Verlängerung oder Verkürzung des Seils im Flaschenzuge. Es stellt also die Zahl, durch welche die Verlängerung oder Verkürzung des Seils in jedem Flaschenzug ausgedrückt wird, die Arbeit der durch diesen Flaschenzug vermittelten Kraft vor, und zwar Bewegungsarbeit, im Falle

der Verlängerung, Widerstandsarbeit im Falle der Verkürzung. Wenn man alle Verlängerungen summirt und ebenso alle Verkürzungen, und letztere Summe von ersterer abzieht, so erhält man die Gesammtverlängerung des Seiles, und daraus folgt: Die Gesammt-Bewegungsarbeit, welche bei einer Bewegung eines, von beliebigen Kräften angegriffenen Körpers geleistet wird, ist gleich dem Unterschied zwischen der Summe der Bewegungsarbeiten und der Summe der Widerstandsarbeiten der einzelnen Kräfte.

Werden in der Weise, wie wir es im vorigen Abschnitt gethan haben, die gegebenen Kräfte durch eine oder mehrere Mittelkräfte ersetzt, so müssen dieselben offenbar die nämliche Bewegung des Körpers und daher die nämliche Gesammtarbeit ergeben, wie die einzelnen Kräfte zusammen. Die Bewegungsarbeit der einen oder mehrerer Mittelkräfte ist folglich gleich dem Ueberschuss der Summe der Bewegungsarbeiten über die Summe der Widerstandsarbeiten der einzelnen Seitenkräfte.

Wenn man nun die verschiedenen Fälle des Gleichgewichts, die wir im §. 58 durchgenommen haben, aufmerksam durchgeht, so findet man, dass entweder die Mittelkraft selber Null sein muss, wie bei einem völlig freien Körper, oder dass doch, bei unfreien Körpern, die Wege Null sind, welche bei Bewegungen derselben, wie sie von den festen Punkten oder Achsen die sie haben, oder von den festen Flächen, gegen welche sie sich stützen, allein zugelassen werden, von den Angriffspunkten der einen oder mehrerer Mittelkräfte in der Richtung dieser Kräfte zurückgelegt werden. In jedem Fall ist also die Arbeit der einen oder mehrerer Mittelkräfte Null und daher die Summe der Bewegungsarbeiten der einzelnen Kräfte gleich der der Widerstandsarbeiten.

Es mag schliesslich nicht überflüssig sein zu bemerken, dass die beiden Formen, in welchen der Satz von der Gleichheit der Bewegungs- und Widerstandsarbeiten im §. 101 ausgesprochen wurde, nicht immer nothwendig zusammenfallen. Wenn die betrachteten Kräfte im Gleichgewicht und dazu die einzigen sind, welche an dem Körper wirken, so ist nur eine gleichförmige Bewegung des Körpers möglich, und sagt also der zweite Satz dasselbe wie der erste. Damit aber die Bewegung eines Körpers gleichförmig sei, ist es nicht nöthig, dass alle auf ihn wirkenden Kräfte unter sich im Gleichgewicht seien. Aber die übrig bleibenden können dann keine andere Richtung als in jedem Augenblick die der Senkrechten auf die Bahn des Körpers oder besser ihres Angriffspunktes haben. Denn wäre dies nicht der Fall, so könnte

man sie in zwei Componenten zerlegen, die eine in der Richtung der Bahn, die andere senkrecht darauf. Die erstere würde, alle übrigen Kräfte im Gleichgewicht vorausgesetzt, offenbar die Geschwindigkeit des Körpers verändern müssen, die zweite kann allerdings nur die Richtung der Bewegung beeinflussen. Ist aber die Kraft schon ursprünglich senkrecht auf die Bahn ihres Angriffspunktes, so kann sie nur die Richtung, nicht die Geschwindigkeit des Körpers ändern, diese bleibt also gleichförmig, wenn die übrigen Kräfte unter sich im Gleichgewicht sind. Die Arbeit einer solchen Kraft aber, die senkrecht auf der Bahn ihres Angriffspunktes steht, ist Null (vgl. §. 36). Wenn man folglich bei der Anwendung der zweiten Form des Satzes in §. 101 auch alle Kräfte nimmt, die auf den in gleichförmiger Bewegung begriffenen Körper wirken, so fallen doch die, senkrecht zur Richtung seiner Bewegung, welche mit den übrigen nicht im Gleichgewicht zu sein brauchen, von selbst aus. Ein einfaches Beispiel möge dies näher erläutern.

Man kann einer, an einem Faden aufgehängten Bleikugel a (Fig. 164) einen solchen Anstoss ertheilen, dass sie einen horizontalen Kreis beschreibt. Wenn wir von den Hindernissen der Bewegung, wie von der Steifigkeit des Fadens, dem Luftwiderstande, absehen, so ist es eine einzige Kraft, die Schwerkraft, welche auf die Kugel (sammt Faden) vertikal abwärts wirkt. Diese steht aber in jedem Augenblick senkrecht auf der Bahn ihres Angriffspunktes, der Kugel. Ihre Arbeit ist also Null und die Bewegung der Kugel gleichförmig, wie man ohnehin leicht einsieht.

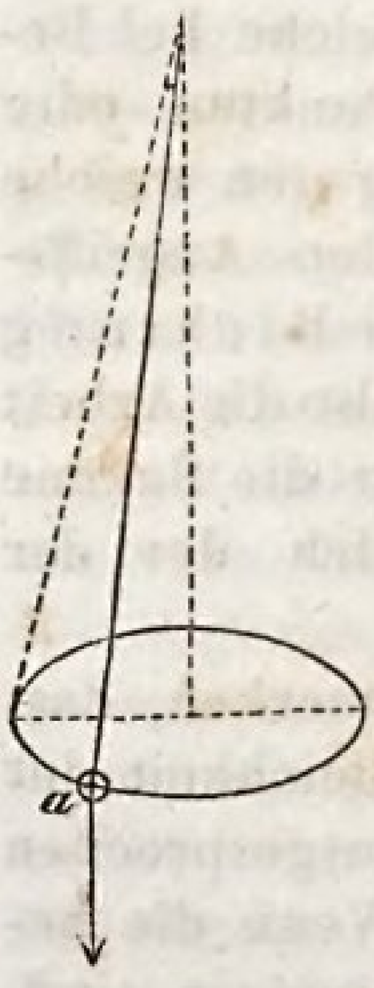


Fig. 164.

Es soll nun noch an einigen Beispielen gezeigt werden, wie durch Anwendung des in den vorhergehenden Paragraphen entwickelten Satzes auf eben so leichte als sichere Weise umgekehrt das Verhältniss der Kräfte, die sich an einer Maschine das Gleichgewicht halten sollen, aufgefunden werden kann.

§. 105. **Die Schraubenpresse.** — Diese Presse besteht aus einer Schraubenspindel A (Fig. 165), welche sich in der feststehenden Mutter B drehen kann und unten in einen Kopf C endigt, der von zwei aufeinander senkrecht stehenden Löchern durchbohrt ist. In eines dieser Löcher steckt man einen Hebel und dreht mittelst desselben die Schraubenspindel um eine gewisse Grösse herum; hierauf nimmt man den Hebel wieder her-

aus und steckt ihn in das andere Loch, um die Spindel wieder um ein bestimmtes Stück zu drehen, und so fährt man fort, so lange die Schraube gedreht werden soll. In Folge dieser Drehung hebt oder senkt sich die Schraubenspindel, je nach dem Sinne, in welchem die Drehung stattfindet. Dieser auf- oder abwärts gehenden Bewegung der Spindel folgt die Platte D, jedoch ohne sich mit herumzudrehen; zu dem Ende wird ihre Bewegung durch zwei vertikale Ständer M und N geleitet, die in Ausschnitte, welche zu beiden Seiten der Platte angebracht sind, eingreifen, während sich der Kopf C in einem an ihr befestigten Lager frei drehen kann. Auf die feststehende Platte E wird der Körper gelegt, welcher gepresst werden soll. An der vorderen Seite dieser Platte bemerkt man eine Art Schnabel; derselbe correspondirt mit einer Rinne, welche auf der oberen Fläche der Platte E rings um dieselbe eingegraben ist und zur Aufnahme und Abführung der Flüssigkeit dient, welche aus gewissen Körpern durch die Wirkung der Presse ausgedrückt wird.

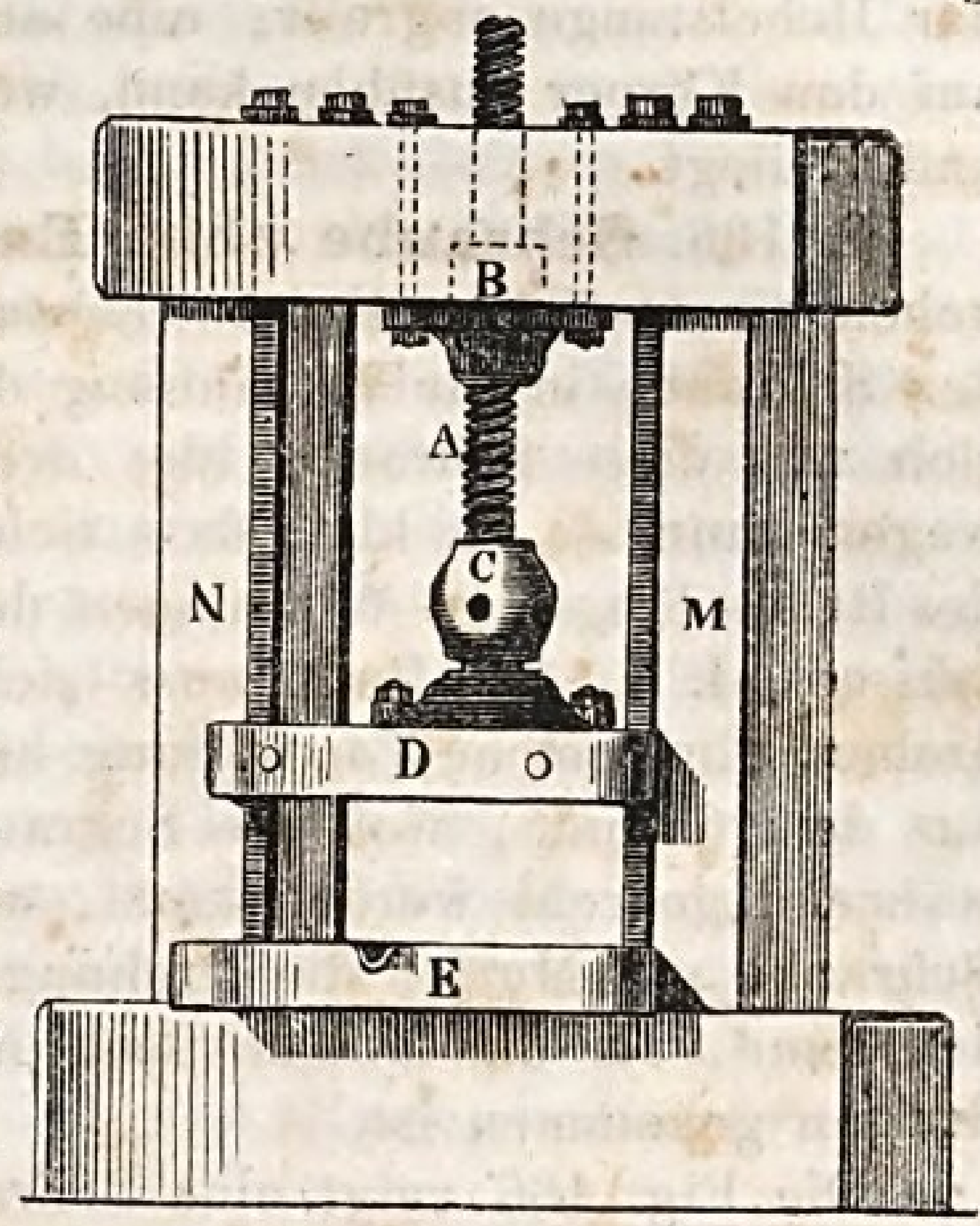


Fig. 165.

Wenn die Schraubenspindel in der passenden Richtung gedreht wird, so geht die Platte D abwärts und legt sich bald an den Körper an, den man auf die feste Platte E gelegt hat; bei fortgesetzter Drehung der Spindel wird daher auf diesen Körper ein Druck ausgeübt, der eine sehr bedeutende Grösse erlangen kann, wie aus folgender Betrachtung hervorgeht: Indem die Schraube eine ganze Umdrehung macht, rückt sie zugleich um ein Stück, gleich ihrer Ganghöhe, abwärts; während also der Angriffspunkt der Kraft den Umfang des Kreises beschreibt, dessen Halbmesser gleich der Länge des durch den Kopf C gesteckten Hebels ist, rückt der Angriffspunkt des Widerstands um die Ganghöhe der Schraube fort. Das in §. 101 angegebene Princip berechtigt uns, daraus zu schliessen, dass das Verhältniss der Kraft zu dem zu überwindenden Widerstand dasselbe ist, wie das Verhältniss der Ganghöhe der Schraube zum Umfang des Kreises, dessen Halbmesser der Länge der Hebelstange gleich ist.

Wenn man nun bedenkt, wie klein die Ganghöhe der Schraube gegen diesen Umfang ist, so wird es einleuchten, dass man mit einer verhältnissmässig schwachen Kraft, welche an dem Ende der Hebelstange angreift, eine ausserordentlich grosse Pressung auf den Körper ausüben kann, welcher zwischen den Platten D und E liegt.

§. 106. **Schraube ohne Ende.** — Manchmal bringt man neben einem Zahnrad eine Schraube so an, dass die Windungen der Schraube in die Verzahnung des Zahnrads eingreifen. Wenn sich nun diese Schraube blos drehen, aber nicht vorwärts bewegen kann, so ist klar, dass sich bei dieser Drehung die Zähne des Rades längs den Windungen der Schraube vorwärts bewegen müssen, d. h. das Rad muss sich gleichfalls um seine Achse drehen. Eine solche Vorrichtung heisst Schraube ohne Ende, aus dem Grunde, weil die Schraube und mit ihr das Rad fortwährend gedreht werden kann, während bei der gewöhnlichen Schraube mit Mutter die Drehung nur so lange fortgesetzt werden kann, als die Mutter noch nicht an das Ende ihrer Windungen gekommen ist.

Die Fig. 166 zeigt eine Schraube ohne Ende, welche dazu dient, eine der Saiten eines Contrebasses zu spannen. Die Schraube greift in ein Rad, welches 20 Zähne trägt und an einem kleinen Cylinder befestigt ist, auf welchen sich die Saite aufwickelt. Wenn die Schraube eine ganze Umdrehung macht, so schreitet das Rad um einen Zahn fort; die Drehung des Rades ist also zwanzigmal langsamer als die der Schraube. Daraus folgt, dass die Kraft, mit welcher an dem Griff der Schraube gedreht werden muss, um die Saite zu spannen, 20mal so klein ist als diejenige, welche zu demselben Zweck nothwendig wäre, wenn jener Griff direct an dem Cylinder, auf welchen sich die Saite aufrollt, befestigt wäre.

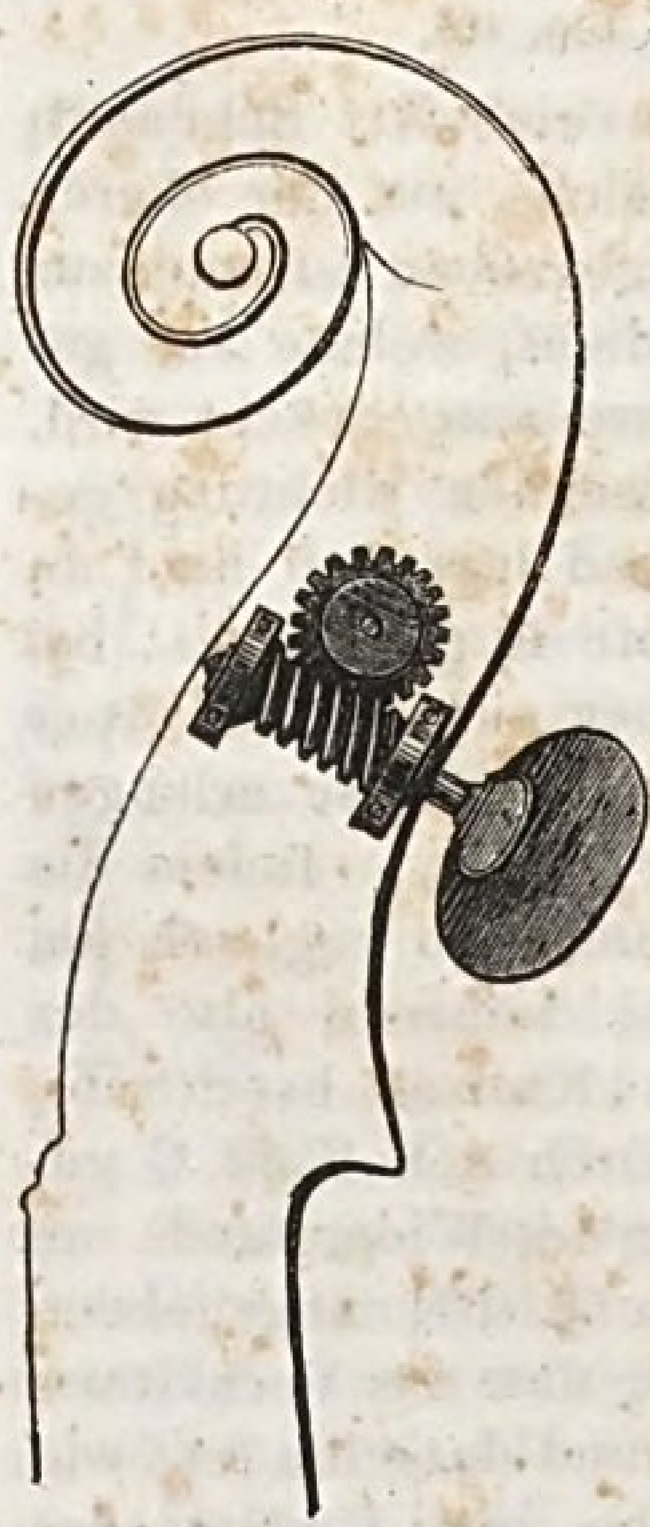


Fig. 166.

§. 107. **Die Differentialwinde und der Differential-Flaschenzug.** In §. 81 haben wir gesehen, dass sich die Kraft, welche an einem Haspel oder einer Winde einer Last das Gleichge-

wicht hält, zu dieser Last verhalten muss, wie der Halbmesser der Haspelwelle zu dem Hebelarm, an welchem die Kraft wirkt. Man sieht daraus, dass man mit Hilfe einer solchen Maschine mit einer gegebenen Kraft einem Widerstand von beliebiger Grösse das Gleichgewicht halten kann, wenn man nur den Halbmesser der Haspelwelle hinreichend klein im Verhältniss zum Hebelarm der Kraft nimmt. Aber in Wirklichkeit darf man doch gewisse Grenzen nicht überschreiten. Einerseits kann man die Länge der Hebelstange, auf welche die Kraft wirken muss, nicht über ein gewisses Maass vergrössern, wenn man nicht eine Maschine erhalten will, die ausserordentlich unbequem und schwer zu handhaben ist; auf der andern Seite darf man aber auch den Halbmesser der Welle nicht zu sehr vermindern, da sie immer noch die nöthige Festigkeit behalten muss, um unter dem Gewicht der zu überwindenden Last nicht zerbrochen zu werden. Für solche Fälle nun, wo der gewöhnliche Haspel nicht mehr ausreicht, tritt die Differentialwinde an seine Stelle, mittelst welcher, ohne Grenze, mit einer beliebig kleinen Kraft einem Widerstande von beliebiger Grösse das Gleichgewicht gehalten werden kann.

Diese Winde unterscheidet sich von der gewöhnlichen Winde oder dem Haspel dadurch, dass ihre Welle aus zwei Cylindern mit ungleichen Halbmessern besteht (Fig. 167). An dem dickeren dieser beiden Cylinder ist das eine Ende eines Seiles festgemacht, welches, nachdem es mehrmals um denselben herumgeschlungen ist, abwärts geht, um sich um den Hals einer losen Rolle zu legen, worauf es wieder emporsteigt und auf den klei-

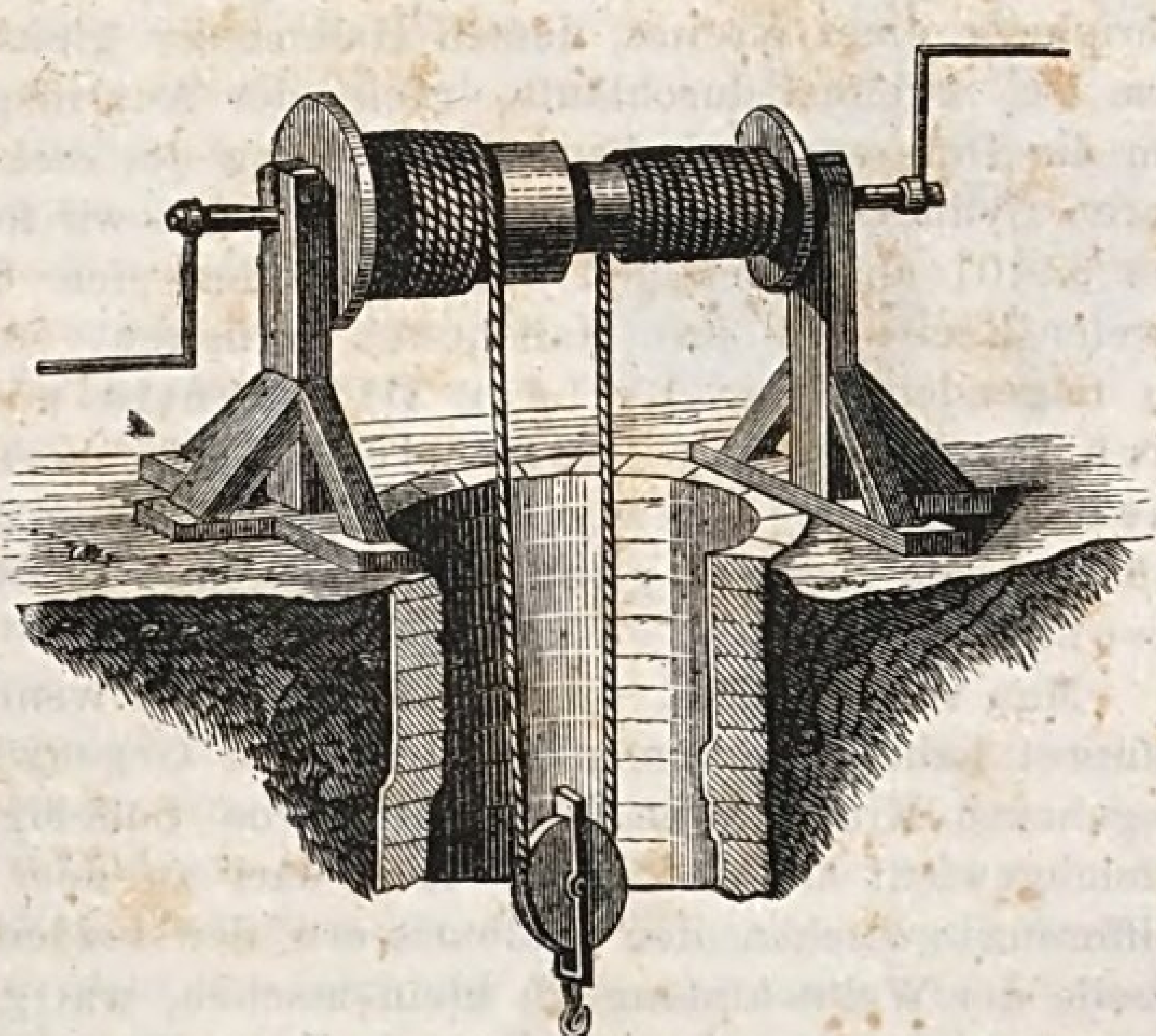


Fig. 167.

neren Cylinder aufgerollt wird, an welchem sein zweites Ende festgemacht ist. An der Scheere der losen Rolle ist der empor zu hebende Körper aufgehängt. An den Enden der Welle sind Kurbeln angebracht, welche dazu dienen, dieselbe zu drehen. Das Seil ist auf den beiden Theilen der Welle so aufgewickelt, dass es sich, während die Welle in dem einen oder anderen Sinne gedreht wird, auf der einen Seite auf- und auf der anderen Seite abwickelt. Um daher den an der Rolle hängenden Körper aufwärts zu ziehen, muss die Welle so gedreht werden, dass sich das Seil an dem dickeren Cylinder auf-, an dem dünneren dagegen abwickelt. Nehmen wir an, es würden zwei Umdrehungen an der Haspelwelle gemacht, so ist klar, dass sich das Seil, an welchem die lose Rolle hängt, auf der einen Seite um den doppelten Umfang des dickeren Cylinders verkürzt, während es sich auf der anderen Seite um den doppelten Umfang des kleineren Cylinders verlängert; es verkürzt sich also im Ganzen um die doppelte Differenz zwischen dem Umfang des dickeren und dem des dünneren Cylinders. Diese Verkürzung des frei herabhängenden Theiles des Seiles vertheilt sich gleichmässig auf die beiden Seilstücke, welche die Rolle tragen und welche als parallel angesehen werden können; daraus folgt, dass die Rolle um eine Strecke gleich der Differenz der Umfänge der beiden Cylinder empor steigt. Während also der Angriffspunkt der Kraft die Peripherie eines Kreises, dessen Halbmesser gleich dem Kurbelarm ist, zweimal durchläuft, rückt der Angriffspunkt der Last um die Differenz zwischen dem Umfang des dickeren und dünneren Cylinders der Welle vorwärts. Wenn wir folglich den Satz des §. 101 anwenden und bemerken, dass sich die Peripherien zweier Kreise wie ihre Halbmesser verhalten, so gelangen wir zu folgendem Satz: Bei der Differentialwinde verhält sich die Kraft zur Last, wie die Differenz der Halbmesser der beiden Cylinder der Welle zur doppelten Länge des Hebel- oder Kurbelarms, an welchem die Kraft angreift.

Man sieht daraus, dass es richtig war, wenn wir oben behauptet haben, dass man mit Hilfe der Gegenwinde mit einer gegebenen Kraft einem Widerstand von beliebiger Grösse das Gleichgewicht halten könne. Man darf zu dem Ende nur die Differenz zwischen den Halbmessern der beiden cylindrischen Theile der Welle hinlänglich klein machen, was geschehen kann, ohne ihrer Dicke selbst und somit ihrer Festigkeit irgend Eintrag zu thun.

Eine sehr hübsche und zweckmässige Anwendung desselben Gedankens, welcher der Differentialwinde zu Grunde liegt, hat man in neuester Zeit bei dem Differentialflaschenzug gemacht. Derselbe besteht aus zwei fest mit einander verbundenen, gewöhnlich aus einem Stück gegossenen eisernen Rollen A und B (Fig. 168) und der losen Rolle C, an welcher die aufzuziehende Last hängt. Die eine der ersteren Rollen, A, ist etwas grösser als die andere, B. Um diese drei Rollen schlingt sich eine endlose Kette in der Weise, wie es die Figur deutlich zeigt. Damit die Kette nicht über die Rollen gleitet, sind sie an ihrem Halse ringsum mit warzenförmigen Vorsprüngen versehen, über welche sich die einzelnen Kettenglieder legen. Diese Vorsprünge müssen natürlich, wie die Kettenglieder, alle von gleicher Grösse sein. Ihre Anzahl ist daher auf der Rolle A nothwendig etwas grösser als auf der B. Nehmen wir an, erstere habe 20, letztere 19 solcher Vorsprünge. Wenn dann durch Ziehen an der Kette in der Weise, wie es die Hand in der Figur andeutet, die beiden Rollen A und B einmal herumbewegt werden, so hat sich offenbar der Theil *aa* der Kette um 20 Kettenglieder verlängert, oder der Angriffspunkt der Kraft ist um eine Länge gleich der von 20 Kettengliedern fortgeschritten; das Kettenstück *dd* dagegen hat sich um 19 Kettenglieder verkürzt, die ganze Schleife *aadd* ist folglich um 1 Glied länger geworden. Umgekehrt hat sich der Kettentheil *bb* um 20 Glieder verkürzt, der *cc* um 19 verlängert, sodass die Schleife *bbcc* um 1 Kettenglied kürzer geworden und daher die Last um ein halbes Kettenglied gestiegen ist. Der Weg der Kraft verhält sich demnach zu dem der Last wie 20 zu $1/2$ oder wie 40 zu 1. Es kann folglich, abgesehen von Bewegungswiderständen, mit einer gewissen Kraft die 40fache Last gehoben werden. — Wenn



Fig. 168.

freilich, wie es sogar unter gewissen Verhältnissen ein Vorzug dieser Flaschenzüge sein kann, die Last, auch nach Aufhören der Kraftwirkung, an jeder Stelle stehen bleibt, so beträgt die Reibung mindestens ebensoviel als die Kraft, und daher darf man auf eine gewisse Kraft nur die Hälfte, in unserem Beispiele also das 20fache an Last rechnen.

Man verwendet die Differentialflaschenzüge namentlich in Maschinenfabriken zum Aufspannen grösserer Arbeitsstücke auf Drehbänke, Hobelmaschinen etc.

§. 108. **Die Roberval'sche Waage. Die Klingenfeld'sche Tafelwaage.** — Die Roberval'sche, auch Strassburger Waage genannt, welche in Fig. 169 abgebildet ist, hat für den gewöhnlichen Gebrauch den Vorzug vor der gemei-

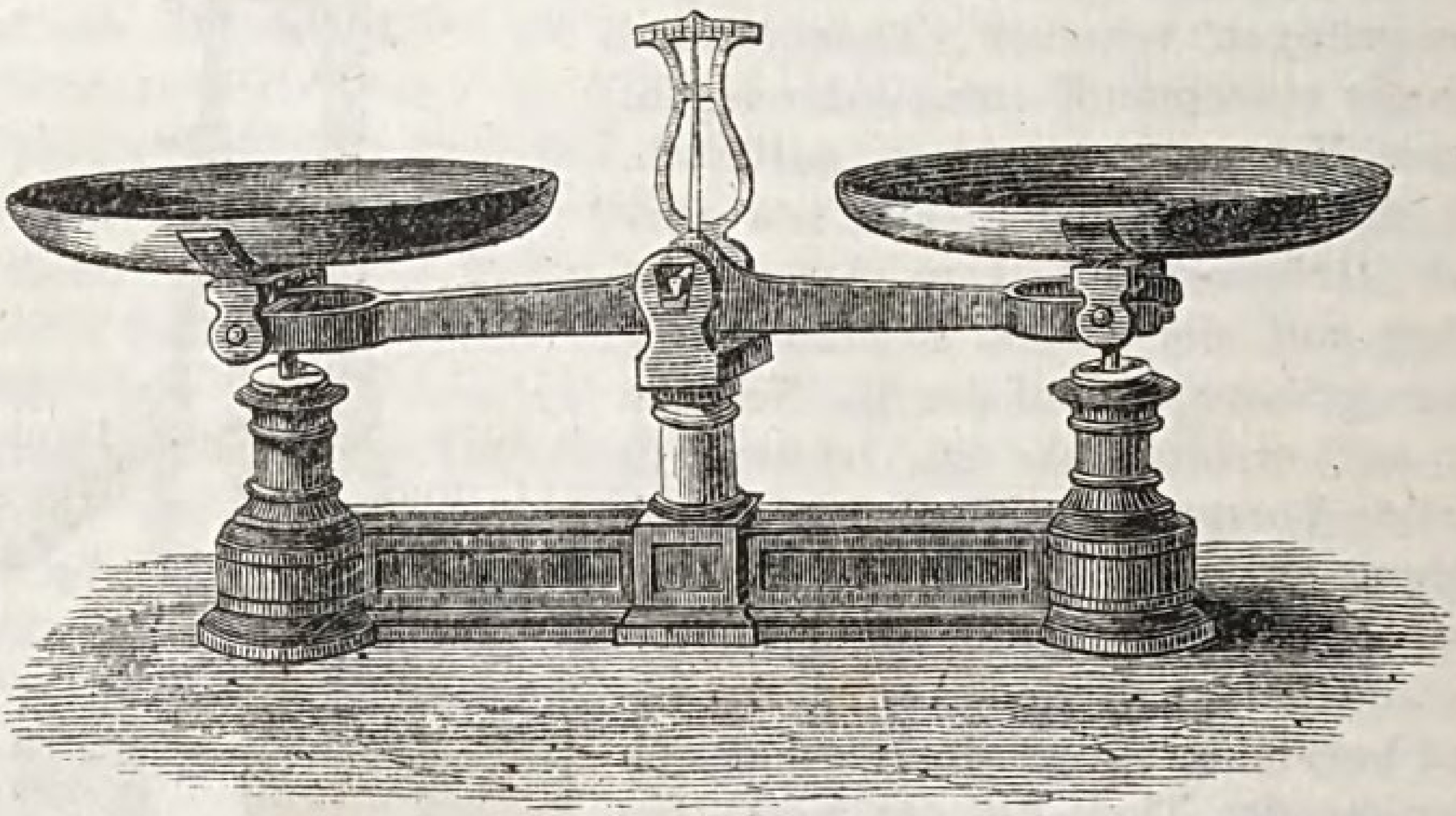


Fig. 169

nen Waage, dass ihre Waagschalen von allen Seiten frei und zugänglich, nicht von Schnüren oder Aufhängketten umgeben sind, sodass der zu wiegende Körper, welcher hinein zu legen ist, von beliebiger Gestalt und Grösse sein kann.

Die Construction dieser Waagen gründet sich auf folgendes Princip. Man denke sich ein Parallelogramm ABDC (Fig. 170), welches von vier starren, unbiegsamen Stäben AB, AC, BD, CD gebildet wird, die in ihren Zusammenstossungspunkten wie in Scharnieren beweglich sind. Die Mitten E, F der Stäbe AB und CD seien beide in einer unveränderlichen Lage festgehalten, jedoch so, dass sich diese Stäbe, jeder für sich, ohne Schwierigkeit um sie drehen können. Wenn man die Gestalt des Parallelogramms verändert, indem man die Seite AB um den Punkt E

dreht, bis sie die Lage A′B′ erhält, so wird die untere Seite CD in die Lage C′D′ kommen, und die beiden andern Seiten, welche die Lagen A′C′ und

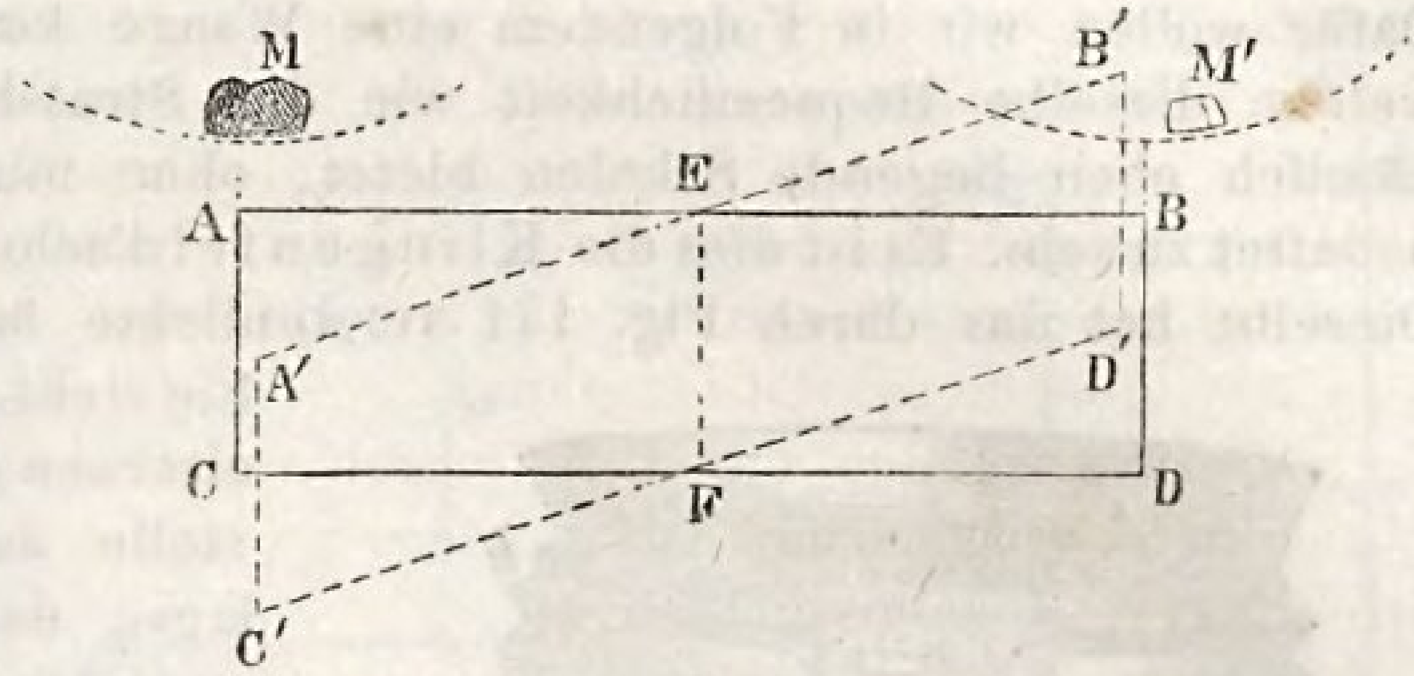


Fig. 170.

B′D′ erhalten, werden immer parallel zur Linie EF bleiben, wie sie es vorher schon waren. Vorausgesetzt also, dass die Punkte E und F in einer Vertikallinie gelegen sind, so bleiben auch die Seiten AC und BD immer vertikal, wie man auch die Gestalt des Parallelogramms ABCD verändern mag. Ferner ist leicht einzusehen, dass die Grösse, um welche sich irgend ein Punkt von AC selbst, oder ein damit in fester Verbindung stehender, in vertikaler Richtung gesenkt hat, wenn AC nach A′C′ zu liegen kommt, genau gleich ist der Grösse, um welche sich irgend ein Punkt von BD oder ein damit in fester Verbindung stehender, zu gleicher Zeit in derselben Richtung erhebt. Denkt man sich daher, dass an den Stäben AC und BD zwei Waagschalen befestigt sind, welche die Körper M und M′ tragen, so folgt aus dem Princip des §. 101, dass in der Lage ABCD nur dann Gleichgewicht bestehen kann, wenn die Gewichte der beiden Körper gleich gross sind, wo dieselben auch auf den Waagschalen liegen mögen; denn diese Gewichte müssen sich verhalten wie die in der Richtung der Vertikalen gemessenen Wege, welche die Schwerpunkte der Körper beschreiben, wenn sich die eine Schale senkt und die andere hebt.

Für die wirkliche Ausführung der Waage ist es nothwendig, die verschiedenen Stücke so anzufertigen, dass das ganze Parallelogramm sehr leicht beweglich ist, eine Bedingung, die unerlässlich ist, wenn das Gewicht eines Körpers mit einiger Genauigkeit gefunden werden soll. Es geschehen daher die Bewegungen überall nicht in Scharnieren, sondern um Schneiden. Näher auf die Construction einzugehen halten wir hier aber um so weniger für nothwendig, als es bei den grossen Schwierigkeiten, welchen eine genaue Ausführung derselben unterliegt, sehr schwer hält, eine richtige derartige Waage zu erhalten. In Preussen sind sie desshalb auch für den öffentlichen Verkehr verboten.

Dafür wollen wir in Folgendem eine Waage kurz beschreiben, welche dieselbe Bequemlichkeit wie die Strassburger Waagen, nämlich oben liegende Schalen bietet, ohne mit ihren Fehlern behaftet zu sein. Es ist dies die Klingenfeld'sche Tafelwaage. Dieselbe hat das durch Fig. 171 versinnlichte äussere Ansehen.

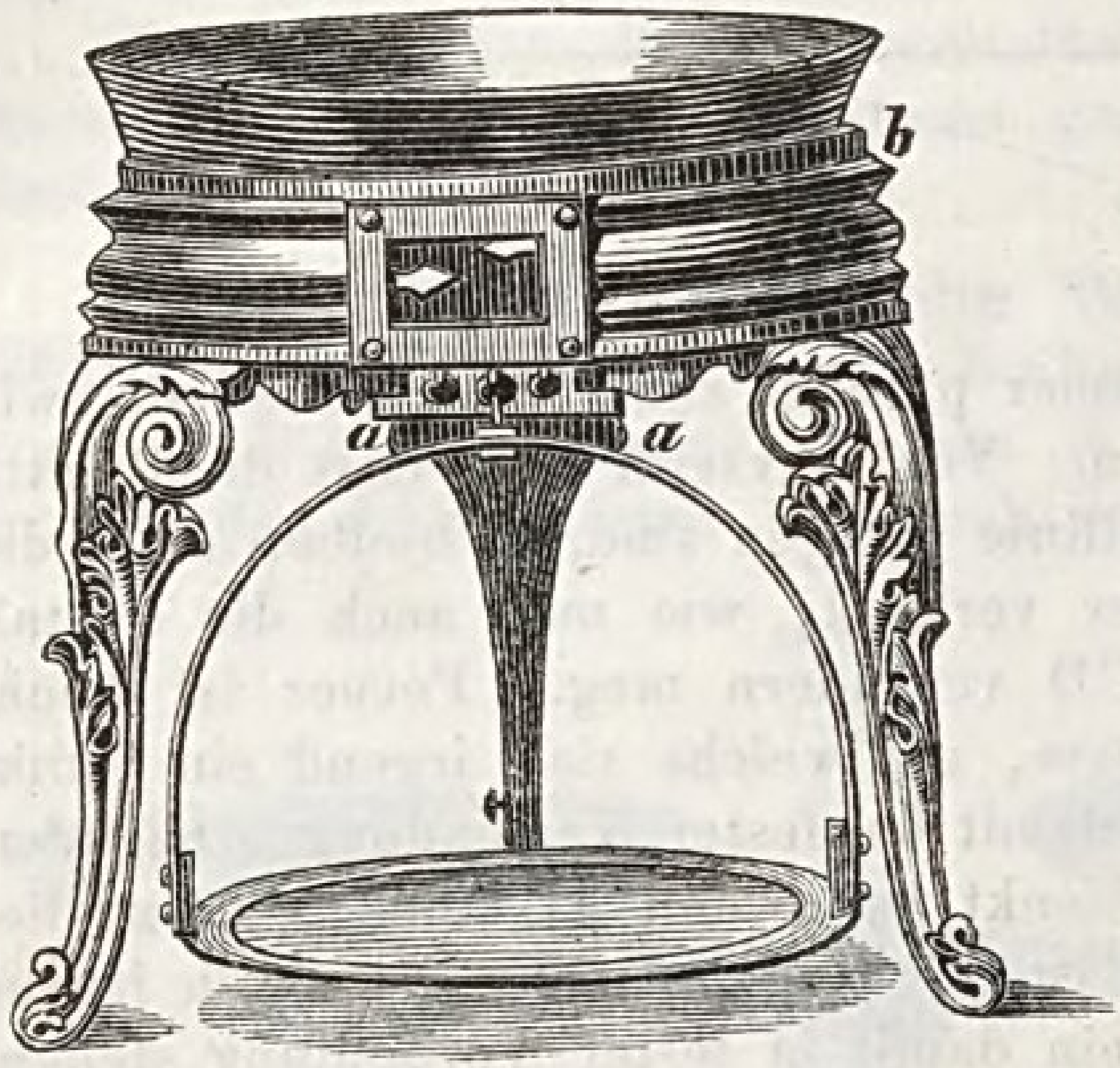


Fig. 171.

Sie steht mit ihrem gusseisernen dreifüssigen Gestelle auf einer Unterlage, dem Tisch z. B., und ihre beiden Schalen befinden sich untereinander, sodass sie den möglichst kleinsten Raum einnimmt. Auf die obere Schale, welche nach oben und nach allen Seiten hin frei ist, werden die Waaren gelegt, auf die untere die Gewichte. Unmittelbar unter der Oberschale befinden sich an einem gusseisernen Kranze zwei Messingrähmchen (in Fig. 171 ist nur eines sichtbar) innerhalb deren zwei Zungen spielen, von denen eine, oberhalb eines Fusses befindliche, dem Käufer zugekehrt ist, während vor der andern der Verkäufer steht. Wenn die Zunge einspielt, sind die aufgelegten Waaren und Gewichte gleich schwer, und es ist gleichgiltig, ob die Waaren oder Gewichte in der Mitte der Schalen liegen, oder nicht.

Der innere Mechanismus der Waage besteht im Wesentlichen aus zwei gleicharmigen Waagbalken, deren Anordnung aus Fig. 172 ersichtlich ist, welche sie, von oben gesehen, als einfache Linien darstellt. bc ist der eine dieser Waagbalken, in seiner Mitte mit dem Querarm aa' verbunden, der an seinen Enden die beiden Schneiden trägt, um welche sich der Waagbalken dreht. Die Enden b, c des letzteren tragen gleichfalls Schneiden, die aber nach aufwärts gekehrt sind. Der andere Waagbalken wird durch die beiden Stäbe de und $d'e'$ gebildet, die in ihren Mitten sowohl, wie an ihren Enden e und e' mit den Querarmen ff' und gg' zu einem Ganzen fest verbunden sind. Der Querarm ff' trägt an seinen Enden wieder Schneiden, um welche sich dieser ganze zweite Waagbalken dreht. Die Enden d und d' des Waagbalkens,

sowie die g, g' des Querarms gg' tragen nach aufwärts gerichtete Schneiden. Die drei Schneiden b, g und g' liegen in einer Ebene und tragen eine gusseiserne Brücke, die in Fig. 171 bei b sichtbar ist, und auf welcher die Oberschale ruht. Die drei Schneiden d, c und d', welche im Gleichgewichtszustande der Waage in **einer** Geraden liegen, tragen gemeinschaftlich einen Metallbügel, der in Fig. 171 bei a sichtbar ist, und an welchem die zur Aufnahme der Gewichte bestimmte Schale hängt.

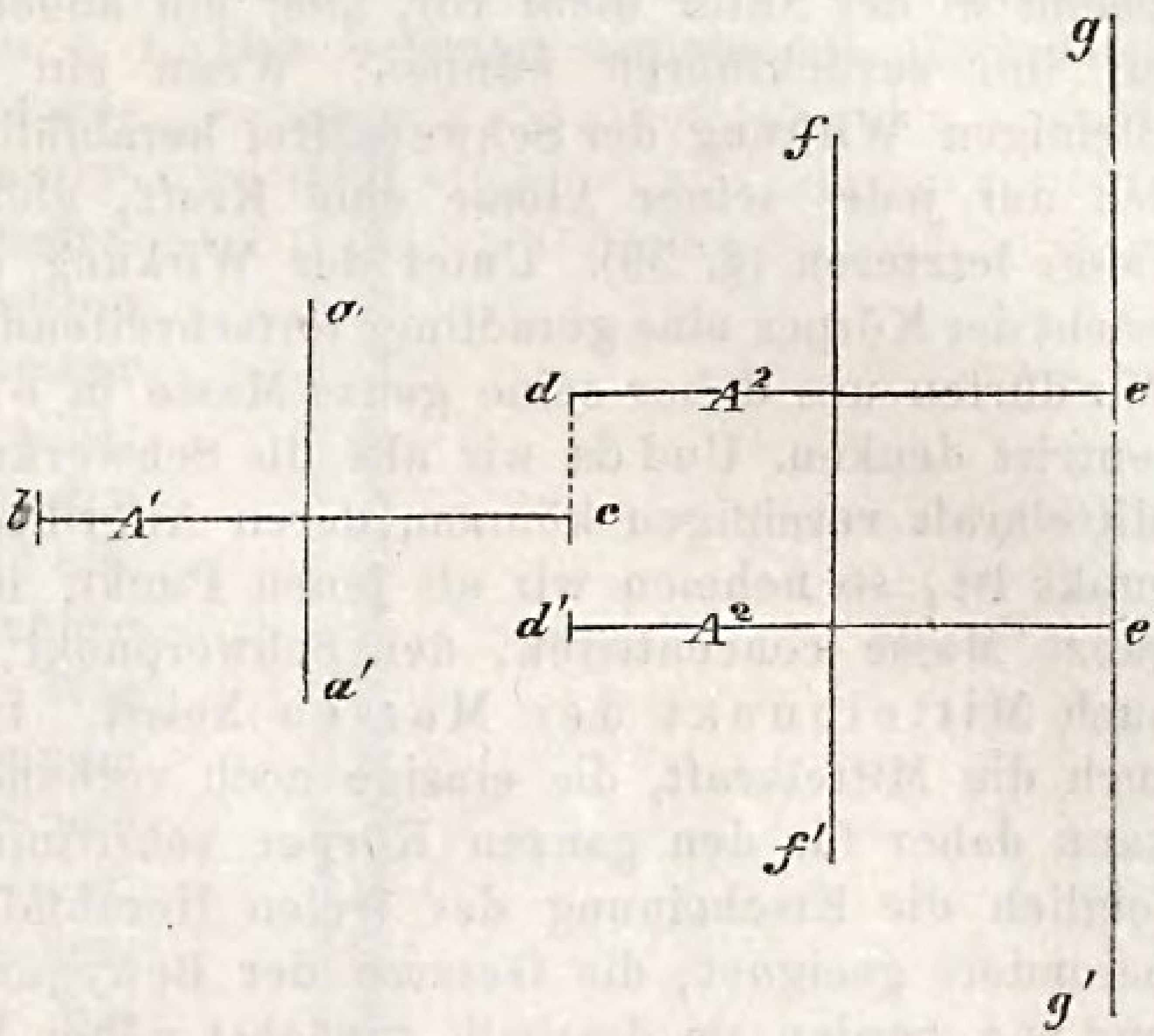


Fig. 172.

VI. Erzeugung und Veränderung der Bewegung durch die Kräfte.

1. Fortschreitende Bewegung.

§. 109. Wenn sich eine Maschine nicht gleichförmig bewegt, so halten sich die an ihr wirkenden Kräfte nicht das Gleichgewicht. Sie können sich theilweise aufheben, aber im Ganzen werden entweder die bewegenden Kräfte die Widerstände überwiegen oder umgekehrt die Widerstände zu gross sein, als dass ihnen die bewegenden Kräfte das Gleichgewicht halten könnten. Um uns über die Wirkungsweise der an einer Maschine thätigen Kräfte, welche sich nicht im Gleichgewicht halten, Rechenschaft geben zu können, müssen wir die Gesetze kennen lernen, nach welchen die Kräfte die Bewegung der Körper, auf welche sie wirken, hervorbringen und verändern. Zu diesem Zwecke nehmen wir zunächst den einfachsten Fall, wo nur eine einzige Kraft von constanter Grösse und Richtung auf einen Körper wirkt, der sich ursprünglich in Ruhe befindet. Dieser einfachste Fall

kommt in der Natur nicht vor, aber ein anderer, den wir leicht auf ihn zurückführen können: Wenn ein Körper unter der alleinigen Wirkung der Schwere frei herabfällt, so wirkt eigentlich auf jedes seiner Atome eine Kraft, gleich dem Gewichte dieses letzteren (§. 59). Unter der Wirkung aller dieser Kräfte macht der Körper eine geradlinig fortschreitende Bewegung (§. 11). Wir dürfen uns daher seine ganze Masse in einem Punkte concentrirt denken. Und da wir alle die Schwerkräfte in eine einzige Mittelkraft vereinigen können, deren Angriffspunkt der Schwerpunkt ist, so nehmen wir als jenen Punkt, in welchem wir die ganze Masse concentriren, den Schwerpunkt, welcher desshalb auch Mittelpunkt der Massen heisst. In ihm wirkt dann auch die Mittelkraft, die einzige noch vorhandene Kraft, und er kann daher für den ganzen Körper substituirt werden. Es ist folglich die Erscheinung des freien Herabfallens eines Körpers besonders geeignet, die Gesetze der Bewegung zu untersuchen, und wir werden sie desshalb zunächst näher betrachten; die Resultate, welche wir daraus erhalten werden, können wir dann durch Analogie leicht auf die Wirkung anderer Kräfte ausdehnen.

§. 110. **Fall der Körper.** — Wenn man einen Körper, der in der Hand gehalten wird, loslässt, so fällt er herab, bis er einem Hinderniss begegnet, welches sich der Fortsetzung seiner Bewegung widersetzt. Man bemerkt dabei bald, dass verschiedene Körper sehr verschieden lange Zeit brauchen, um dieselbe Höhe herabzufallen; sie fallen mit sehr verschiedener Geschwindigkeit. So fällt eine Bleikugel, ein Stein mit grosser Schnelligkeit herab, während eine leichte Flaumfeder, ein Schneeflocken, eine Seifenblase viel längere Zeit brauchen, um dieselbe Höhe herabzufallen. Aber diese Unterschiede in den Geschwindigkeiten entspringen lediglich aus dem Widerstande, welchen die Luft der Bewegung dieser verschiedener Körper entgegensetzt, und welcher sich bei dem einen viel mehr fühlbar macht als bei dem andern. Dies kann durch folgenden Versuch vollständig erwiesen werden.

Man nimmt eine weite, etwa zwei Meter lange Glasröhre, die an ihren beiden Enden durch messingene Fassungen verschlossen ist. An einer dieser Fassungen ist ein kurzes messingenes Ansatzröhrchen angebracht, welches mit einem Hahn versehen ist, mittelst dessen das Innere der Glasröhre nach Belieben mit der äusseren Luft in Verbindung gesetzt oder von derselben abgeschlossen werden kann. In das Innere der Glasröhre bringt man kleine Körper verschiedener Art, wie Blei-

stückchen, Papierschnitzelchen, kleine Goldblättchen, Stückchen eines Federbartes u. s. f. Man befestigt alsdann die Röhre mittelst eines Schraubengewindes, das an dem untersten Ende des Ansatzröhrchens eingeschnitten ist, auf dem Teller einer Luftpumpe (Fig. 173); hierauf öffnet man den Hahn und pumpt die Luft, welche in der Glasröhre enthalten ist, aus. Wie eine solche Luftpumpe eingerichtet ist und wie man sich ihrer bedient, um luftleere Räume herzustellen, werden wir später sehen. Wenn die Röhre, wenigtens bis auf eine sehr geringe Quantität Luft, ausgepumpt ist, so schliesst man den Hahn, schraubt die Röhre ab und kehrt sie darauf rasch um, um sie in die in Fig. 174 bezeichnete Lage zu bringen. Dadurch werden die kleinen Körper, welche sich in der ersten Lage unten in der Röhre befanden, schnell an das obere Ende des Raumes versetzt, welchen man luftleer gemacht hat, und man sieht sie nun alle mit einander in derselben Weise herabfallen; zu gleicher Zeit von dem oberen Ende der Röhre abgehend, kommen sie mit einander an dem unteren Ende an. Wenn

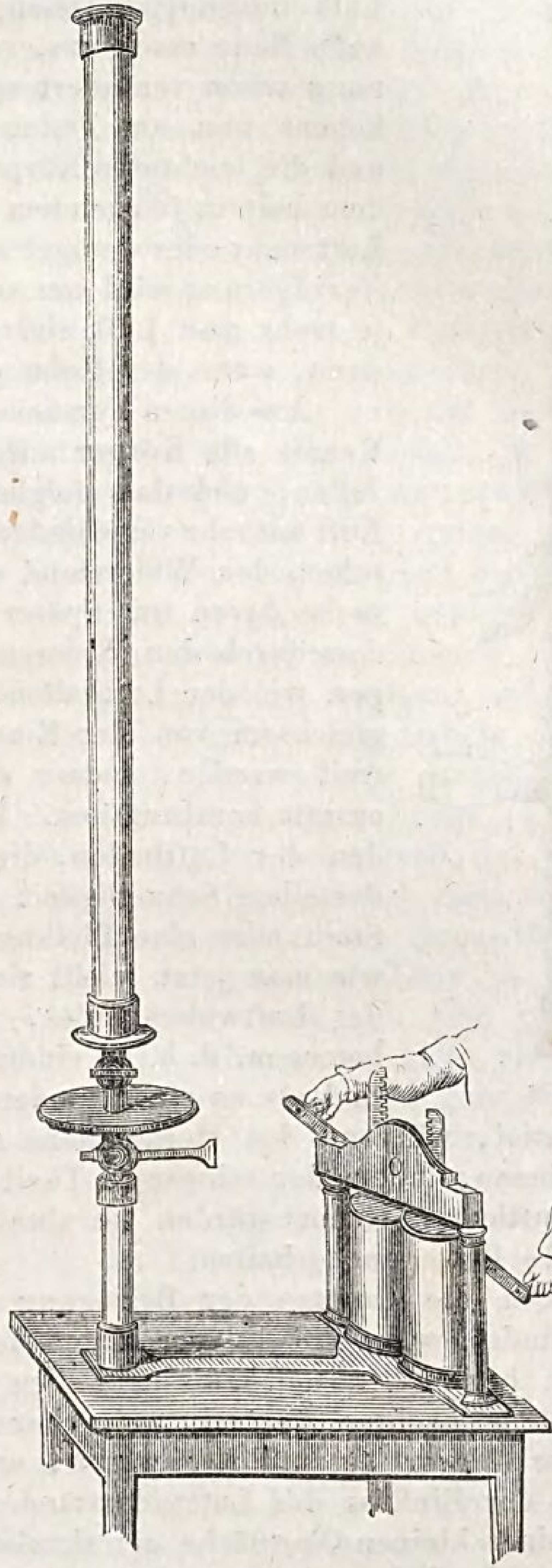


Fig. 173.

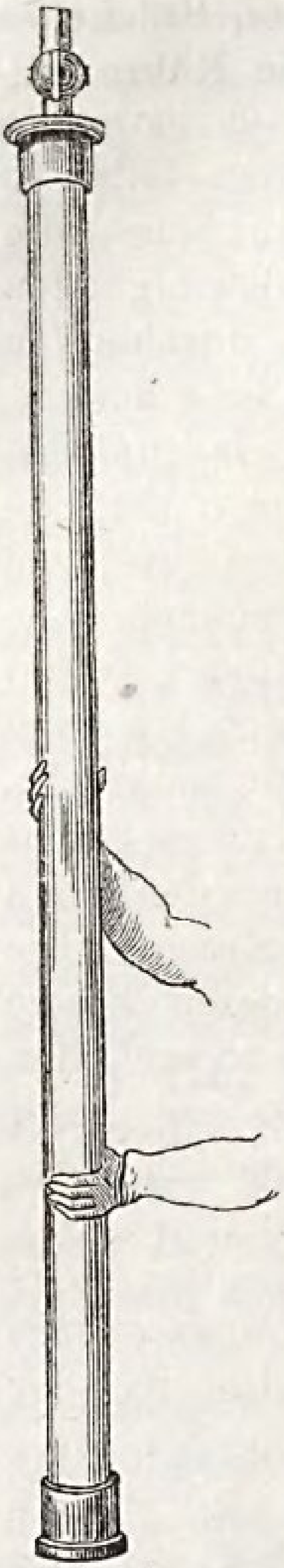


Fig. 174.

man aber den Hahn ein wenig öffnet und sogleich wieder schliesst, um eine kleine Menge Luft eintreten zu lassen, und man kehrt die Röhre auf's Neue rasch um, so wird man die Erscheinung schon verändert sehen. Das Stückchen Blei kommt nun am ersten unten in der Röhre an, und die leichteren Körper folgen ihm, einer nach dem andern, je nachdem sie durch die eingetretene Luft mehr oder weniger aufgehalten werden. Diese Verzögerung wird um so besser bemerkt werden, je mehr man Luft eintreten lässt, und am besten dann, wenn der Hahn ganz geöffnet bleibt.

Aus diesen Versuchen folgt, dass im luftleeren Raume alle Körper mit gleicher Geschwindigkeit fallen, und dass folglich, wenn wir sie in der Luft mit sehr verschiedener Geschwindigkeit fallen sehen, der Widerstand der Luft die einzige Ursache davon ist. Später werden wir sogar sehen, dass durch den Widerstand der Luft gewisse Körper, wie der Luftballon, die Wolken, der Rauch, gleichsam von der Einwirkung der Schwere befreit werden, sodass sie in die Höhe steigen, anstatt herabzufallen. Im luftleeren Raume würden der Luftballon, die Wolken, der Rauch mit derselben Schnelligkeit zu Boden fallen wie ein Stein oder eine Bleikugel. Nicht minder ist es, wie man jetzt leicht sieht, lediglich eine Folge des Luftwiderstandes, wenn Körper, die nicht homogen, d. h. an einem Theil specifisch schwerer sind als an einem anderen, wie z. B. ein Beil mit Holzstiel, während des Herabfallens eine drehende Bewegung annehmen, indem der schwerere Theil sich nach unten kehrt. Im luftleeren Raum würden sie eine geradlinig fortschreitende Bewegung erhalten.

Um die Gesetze der Bewegung zu untersuchen, welche stattfindet, wenn ein Körper unter dem Einfluss der Schwere allein herabfällt, sollte dieses Fallen eigentlich im luftleeren Raum beobachtet werden; weil aber die Versuche in dieser Weise schwer auszuführen wären, und weil auf der anderen Seite der Einfluss des Luftwiderstandes auf solche Körper, die bei einer kleinen Oberfläche ein ziemlich grosses Gewicht haben, ausserordentlich gering ist, so begnügt man sich damit, die Fall-

bewegung an Körpern der letzteren Art im lufterfüllten Raum zu beobachten.

§. 111. **Galilei's schiefe Ebene.** — Wenn man die Schnelligkeit bedenkt, mit welcher eine Bleikugel herabfällt, so sieht man ein, dass es grosse Schwierigkeiten haben muss, die Räume zu beobachten, welche sie in den aufeinanderfolgenden Secunden, vom Anfange ihres Falles an gerechnet, durchlaufen hat. Aber wo man auf direktem Wege nicht zum Ziele kommt, kann man künstliche Mittel anwenden. Lernen wir zunächst das Mittel kennen, dessen sich *Galilei*, der Entdecker der Gesetze des freien Falls der Körper (1600 n. Chr.) bediente, um die in Rede stehende Erscheinung genauer zu erforschen.

In §. 91 (Seite 170) haben wir gesehen, dass das Gewicht eines Körpers, welcher auf einer schiefen Ebene liegt, in zwei Seitenkräfte zerlegt werden kann, von denen die eine senkrecht, die andere parallel zur schiefen Ebene ist. Die erstere sucht den Körper an die schiefe Ebene anzudrücken, ohne denselben nach der einen oder anderen Seite bewegen zu können. Die zweite Seitenkraft dagegen, welche parallel zur schiefen Ebene ist, kann ihre ganze Wirkung ungestört ausüben und den Körper die schiefe Ebene herabbewegen. Die Grösse dieser zweiten Seitenkraft verhält sich zum Gewicht des ganzen Körpers wie die Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Länge (§. 91). Wenn also der Körper der Wirkung jener Seitenkraft frei überlassen wird, so wird er sich die schiefe Ebene herab ganz ebenso bewegen, als wenn er vertikal herabfiele und die Intensität der Schwere im Verhältniss der Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Länge vermindert worden wäre. Wenn man also eine schiefe Ebene gebraucht, deren Höhe z. B. zehnmal so klein als ihre Länge ist, so beobachtet man eine Bewegung, welche ganz ebenso ist, wie die eines frei herabfallenden Körpers sein würde, wenn die Schwerkraft nur zehnmal so klein wäre, als sie wirklich ist.

Dieses sinnreiche Mittel, die Intensität der Schwere und folglich auch die Schnelligkeit der Bewegung, welche sie hervorbringt, so zu sagen nach Belieben zu vermindern, wurde von *Galilei* in folgender Weise zur Ausführung gebracht. Eine gleichförmig dicke, wohlgeglättete Schnur, 10 bis 12 Meter lang, wurde zwischen den Punkten A und B (Fig. 175), von denen der erstere höher lag als der zweite, ausgespannt. Auf diese Schnur wurden zwei kleine metallene Rollen C gesetzt, die durch eine gemeinschaftliche Zwinge mit einander verbunden waren. Durch ein kleines Gewicht, welches an dieser Zwinge

aufgehängt war, wurde der Schwerpunkt der ganzen Vorrichtung unter die Unterstützungspunkte der Rollen gebracht, wodurch dieselben verhindert wurden herabzufallen. Die Rollen an der Zwinge und das Gewicht bildeten so eine Art kleinen Wagen, welcher sich die schiefe Ebene, ohne einen bedeutenden Widerstand zu erfahren, herabbewegen konnte, und es war leicht, den Weg zu beobachten, welchen dieser Körper während der ersten, zweiten, dritten Secunde, vom Anfang der Bewegung an gerechnet, durchlief.

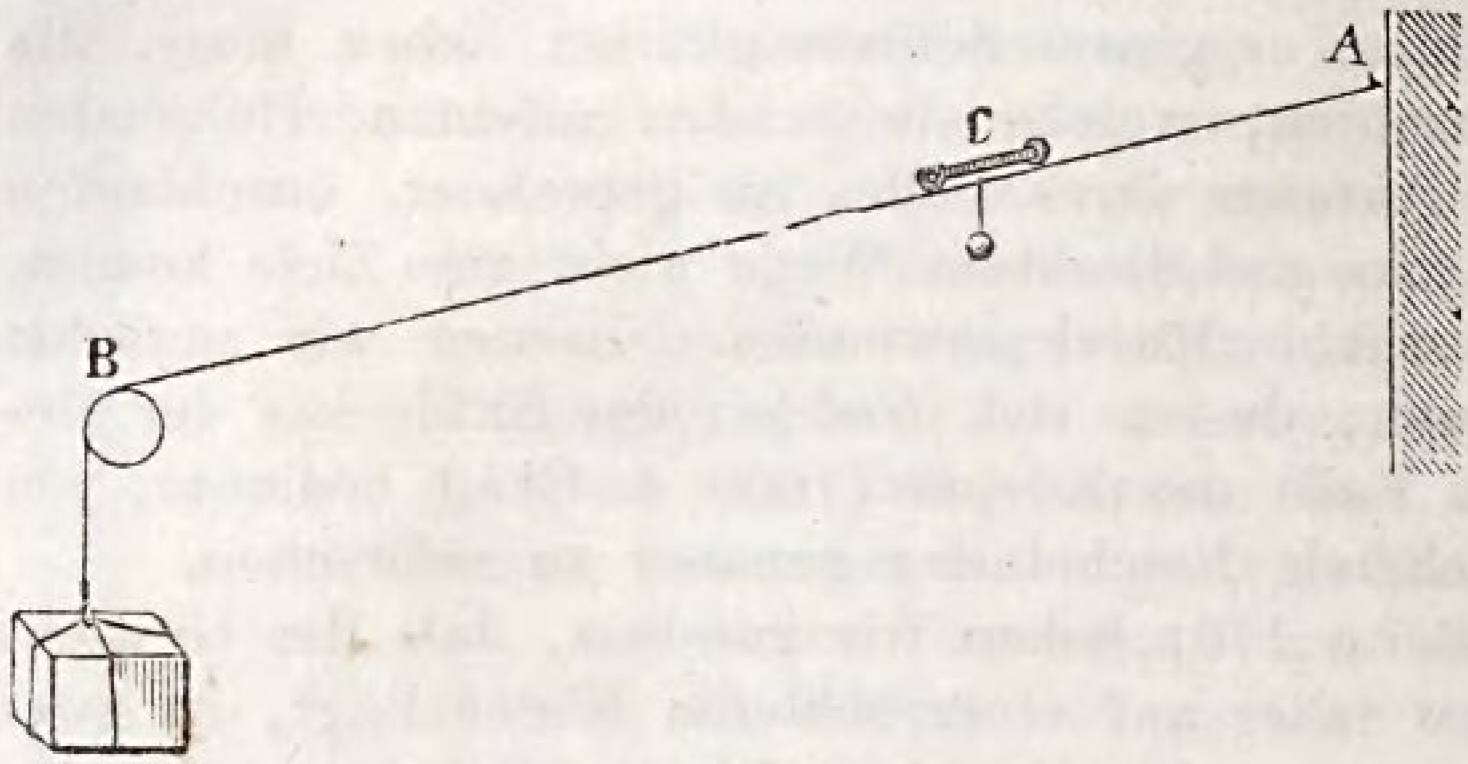


Fig. 175.

§. 112. **Die Atwood'sche Fallmaschine.** — Ein englischer Physiker, *Atwood*, hat zum Zwecke der Beobachtung der Gesetze des Falles der Körper eine Maschine erdacht, die viel bequemer als die schiefe Ebene des *Galilei* ist, und die nach ihm die *Atwood*'sche Fallmaschine genannt wird. Dieselbe hat folgende Einrichtung.

Ueber eine sehr leicht bewegliche Rolle (Fig. 176), welche man an dem obersten Theil der Maschine bemerkt, geht ein feiner Seidenfaden, an dessen Enden Gewichte gehängt werden können. Die grosse Beweglichkeit der Rolle wird durch eine besondere Art der Unterstützung ihrer Achse erreicht; dieselbe ruht nämlich auf den Umfängen von vier Rädern, von denen sich zwei vor, zwei hinter der Rolle befinden und die langsam mit herumgehen, wenn die Rolle in Bewegung ist. (Wir werden später auf diese Art der Unterstützung zurückkommen.) Wenn die beiden Körper, welche an den Enden des Fadens befestigt sind, genau dasselbe Gewicht haben, so bleibt die Rolle in Ruhe, weil die beiden Kräfte, welche auf sie wirken, im Gleichgewicht sind. Wenn aber auf der einen Seite ein kleines Gewicht hinzugefügt wird, so wird das Gleichgewicht gestört und der Faden setzt sich in Bewegung, indem er die Rolle dreht. Nehmen wir z. B. an, dass jeder der beiden gleich schweren Körper, welche an den Enden des Fadens aufgehängt sind, $4\frac{1}{2}$ Gramm wiege, und dass das hinzugefügte Ueber-

gewicht, welches die Bewegung hervorbringt, 1 Gr. schwer sei. Die Gewichte der beiden gleich schweren Körper werden sich, ob nun Gleichgewicht oder Bewegung stattfindet, durch Vermittlung der Rolle immer das Gleichgewicht halten; die Bewegung der drei Körper, welche zusammen 10 Gr. schwer sind, wird also allein durch eine Kraft von 1 Gr. hervorgebracht; sie wird also dieselbe sein, als ob die drei Körper frei herabfielen und die Intensität der Schwere zehnmal so klein geworden wäre. Wenn das Gewicht jedes der beiden gleich schweren Körper $49\frac{1}{2}$ Gr. betrüge, das hinzugefügte Uebergewicht aber immer noch 1 Gr. schwer wäre, so erkennt man leicht, dass die durch letzteres hervorgebrachte Bewegung dieselbe sein würde, als ob die drei Körper frei herabfielen und die Intensität der Schwere hundertmal so klein geworden wäre. Man sieht daraus, dass die *Atwood*'sche Fallmaschine, ganz so wie die schiefe Ebene, es gestattet, die Schnelligkeit der Bewegung der fallenden Körper nach Belieben zu vermindern, ohne die Gesetze dieser Bewegung zu verändern.

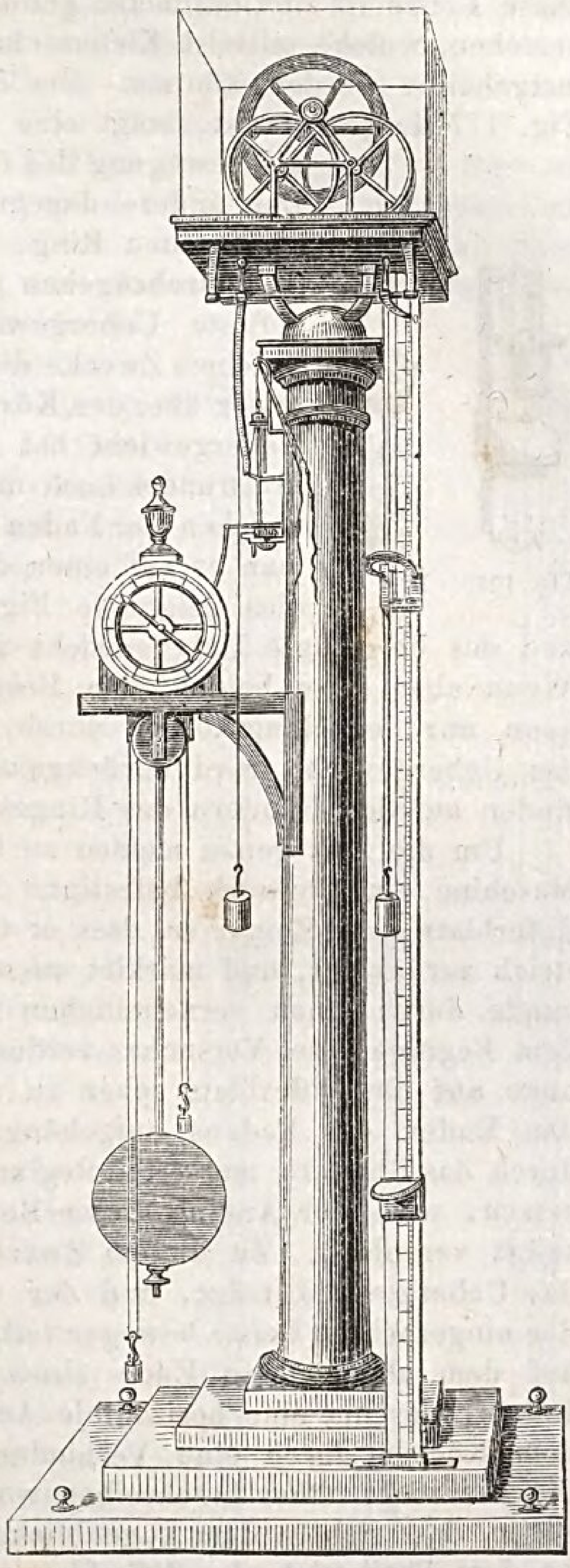


Fig. 176.

Um die Bewegung, welche durch das beigefügte Uebergewicht hervorgebracht wird, leicht beobachten zu können,

ist nahe an der Linie, welche der eine der beiden Körper, indem er nach abwärts geht, beschreibt, eine vertikale Leiste aufgestellt. Diese Leiste ist in Centimeter getheilt und mit zwei Schiebern versehen, welche mittelst Klemmschrauben an beliebigen Stellen festgehalten werden können. Der eine dieser Schieber, der in Fig. 177 dargestellt ist, trägt eine Platte, welche dazu gehört, die Bewegung des fallenden Körpers zu hemmen. Der andere dagegen, welchen Fig. 138 zeigt, trägt einen Ring, welcher dem Körper selbst frei durchzugehen gestattet, das demselben beigefügte Uebergewicht jedoch zurückhält, zu welchem Zwecke dieses letztere zu beiden Seiten etwas über den Körper hervorragen muss. Dieses Uebergewicht hat in seiner Mitte ein kleines kreisrundes Loch und einen breiten Spalt, durch welchen der Faden hindurch gehen kann, wenn man es auf einen der beiden Körper legen will; dies zeigt die Fig. 177, wo sich der Körper und das beigefügte Uebergewicht zusammen abwärts bewegen. Wenn aber diese beiden dem Ringe begegnen (Fig. 178), so kann nur der Hauptkörper durch denselben hindurch gehen; das Uebergewicht wird zurückgehalten, indem es mit seinen Enden auf den Rändern des Ringes liegen bleibt.

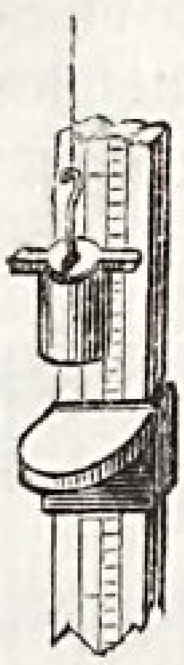


Fig. 177.

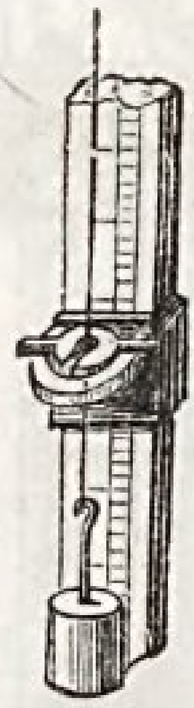


Fig. 178.

Um die Zeit genau messen zu können, ist an der Säule der Maschine ein Uhrwerk befestigt. Dasselbe bewegt vor einem Zifferblatt einen Zeiger so, dass er in jeder Secunde einen Theilstrich zurücklegt, und markirt ausserdem den Anfang jeder Secunde durch einen vernehmlichen Schlag, sodass man die seit dem Beginne eines Versuches verflossenen Secunden zählen kann, ohne auf das Zifferblatt sehen zu müssen. Damit sich die an den Enden des Fadens aufgehängten Körper genau mit dem durch das Uhrwerk markirten Beginn einer Secunde in Bewegung setzen, wird der Anfang dieser Bewegung durch das Uhrwerk selbst veranlasst. Zu diesem Zweck ruht der Körper, welcher das Uebergewicht trägt, und der sich im Abwärtsgehen längs der eingetheilten Leiste bewegen soll, vor Beginn dieser Bewegung auf dem abgeebneten Ende eines metallenen Hakens. Dieser Haken, der um eine horizontale Achse drehbar ist, wird unter dem Körper durch eine Verbindung von Stäben festgehalten, die wir nicht näher beschreiben wollen; wir begnügen uns, zu sagen, dass sich in dem Augenblick, wo der Zeiger des Uhrwerks an dem Theilstrich des Zifferblattes ankommt, welcher vertikal

über der Mitte desselben liegt, der Haken plötzlich senkt, wodurch die Bewegung des Körpers beginnt. Um die von dem Körper zurückgelegten Wege bequemer beobachten zu können, liegt der Nullpunkt der Theilung der vertikalen Leiste mit der untern Fläche des Körpers, wenn dieser von dem oben besprochenen Haken festgehalten wird, in einer Horizontalebene.

§. 113. **Gesetze des Falles der Körper.** — Der am ersten sich darbietende Versuch mit der Atwood'schen Fallmaschine ist der, die Wege zu beobachten, welche von dem fallenden Körper während einer, zwei, drei Secunden, vom Anfang seiner Bewegung an gerechnet, durchlaufen werden. Zu diesem Zwecke stellt man z. B. den Schieber mit der Platte so, dass sich seine obere Fläche 16 Centimeter unter dem Nullpunkt des Maassstabes befindet (Fig. 179), und sucht dann durch Probiren die Grösse, welche das beizufügende Uebergewicht haben muss, damit der Körper diese 16 Centimeter genau in einer Secunde durchläuft. Man erkennt dies daran, dass der Körper, welcher am Anfang einer Secunde seine Bewegung beginnt, genau am Anfang der zweiten Secunde, also mit dem Schlag, der diesen markirt, auf der Platte des Schiebers aufstösst.

Man senkt nun den Schieber, bis er 64 Centimeter unter dem Nullpunkt steht (Fig. 180). Wenn man alsdann den Körper durch dasselbe Uebergewicht in Bewegung setzen lässt, so wird man sehen, dass er gerade zwei Secunden braucht, um von seinem Ausgangspunkte bis zu der Stelle zu gelangen, wo er von dem Schieber aufgehalten wird. Wenn man den Schieber noch weiter herunterlässt, sodass er 144 Cm. vom Nullpunkt entfernt ist (Fig. 181), so sieht man, dass der Körper gerade drei Secunden gebraucht, um diese Entfernung zurückzulegen u. s. w.

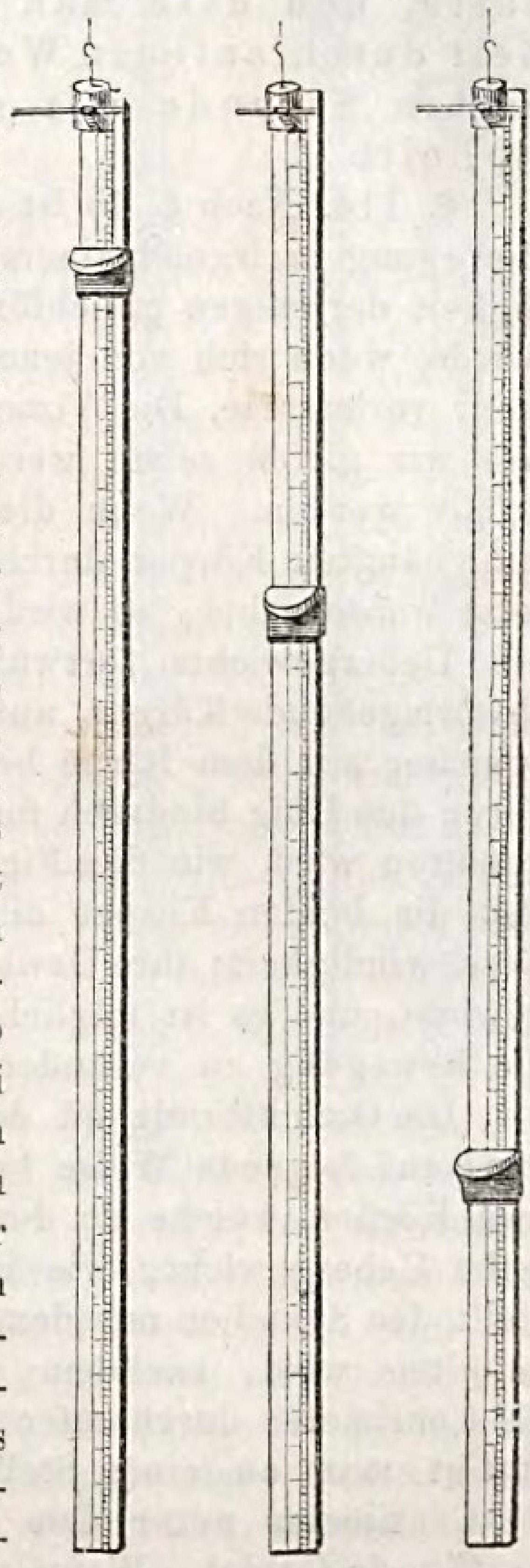


Fig. 179. Fig. 180. Fig. 181.

Nach diesen Versuchen durchfällt also der Körper

in einer Secunde 16 Centimeter,

in zwei Secunden 64 Centimeter, also viermal so viel,

in drei Secunden 144 Centimeter, also neunmal so viel als in einer Secunde u. s. f.

Daraus folgt, dass sich die vom Ausgangspunkt der Bewegung an gemessenen Wege, welche ein Körper, der unter der Wirkung der Schwere frei herabfällt, durchläuft, verhalten wie die Quadrate der Zeiten, welche der Körper zu ihrer Zurücklegung nöthig hatte, und dass man folglich den in irgend einer Zeit durchlaufenen Weg erhält, wenn man den in der ersten Secunde mit dem Quadrat jener Zeit multiplicirt.

§. 114. Nach §. 15 ist die Geschwindigkeit einer veränderten Bewegung in irgend einem bestimmten Augenblick die Geschwindigkeit derjenigen gleichförmigen Bewegung, welche stattfinden würde, wenn sich von jenem Augenblick an die Bewegung nicht mehr veränderte. Die Voraussetzungen dieser Definition können, wie wir gleich sehen werden, an der Atwood'schen Maschine erfüllt werden. Wenn die beiden, an den Enden des Fadens aufgehängten Körper durch ein Uebergewicht in Bewegung gesetzt worden sind, so wird diese Bewegung durch die Wirkung des Uebergewichts fortwährend beschleunigt; aber wenn der abwärtsgehende Körper, auf welchem das Uebergewicht liegt, dem Schieber mit dem Ringe begegnet, so setzt er selbst seinen Weg durch den Ring hindurch fort, während das Uebergewicht zurückgehalten wird, wie dies Fig. 178 zeigt. Von da ab bewegen sich also die beiden Körper allein in Folge der bereits gewonnenen Geschwindigkeit; ihre Gewichte halten sich gegenseitig das Gleichgewicht, und es ist folglich keine Kraft mehr vorhanden, welche die Bewegung zu verändern sucht; diese ist also gleichförmig.

Die Gleichförmigkeit der so erhaltenen Bewegung kann übrigens auf folgende Weise bestätigt werden. Man nimmt dieselben zwei Körper, welche an dem Faden aufgehängt werden, und dasselbe Uebergewicht, wie im vorhergehenden Paragraphen, und stellt den Schieber mit dem Ring so, dass das Uebergewicht aufgehalten wird, nachdem der fallende Körper eine Höhe von 16 Centimeter durchlaufen hat; den Schieber mit der Platte befestigt man an einer Stelle, wo die Oberfläche der letzteren 48 Centimeter unter dem Nullpunkt des Maassstabs liegt, wie es Fig. 182 zeigt. Wenn man hierauf die Körper in Bewegung

setzt, so sieht man mit Hilfe des Uhrwerks, dass zu Ende der ersten Secunde das Uebergewicht aufgehalten wird, und dass zu Ende der zweiten Secunde der Körper selbst, welcher durch den Ring gegangen ist, gegen die Platte des unteren Schiebers stösst. Man beginnt nun den Versuch von Neuem, mit dem Unterschied jedoch, dass man zuvor den Schieber mit der Platte 80 Centimeter unter den Nullpunkt stellt, wie es Fig. 183 zeigt; dann verfliesst natürlich vom Anfang der Bewegung bis zu dem Augenblick, wo das Uebergewicht von dem Ring aufgehalten wird, wieder genau eine Secunde; der Körper aber, welcher seine Bewegung durch den Ring hindurch fortsetzt, braucht nun zwei Secunden, um von diesem bis zur Platte des untern Schiebers zu gelangen. Dies zeigt, dass der abwärts gehende Körper, nachdem er sein Uebergewicht auf dem Ring zurückgelassen hat, 32 Centimeter in einer und 64 Centimeter in zwei Secunden durchläuft, dass seine Bewegung also eine gleichförmige ist.

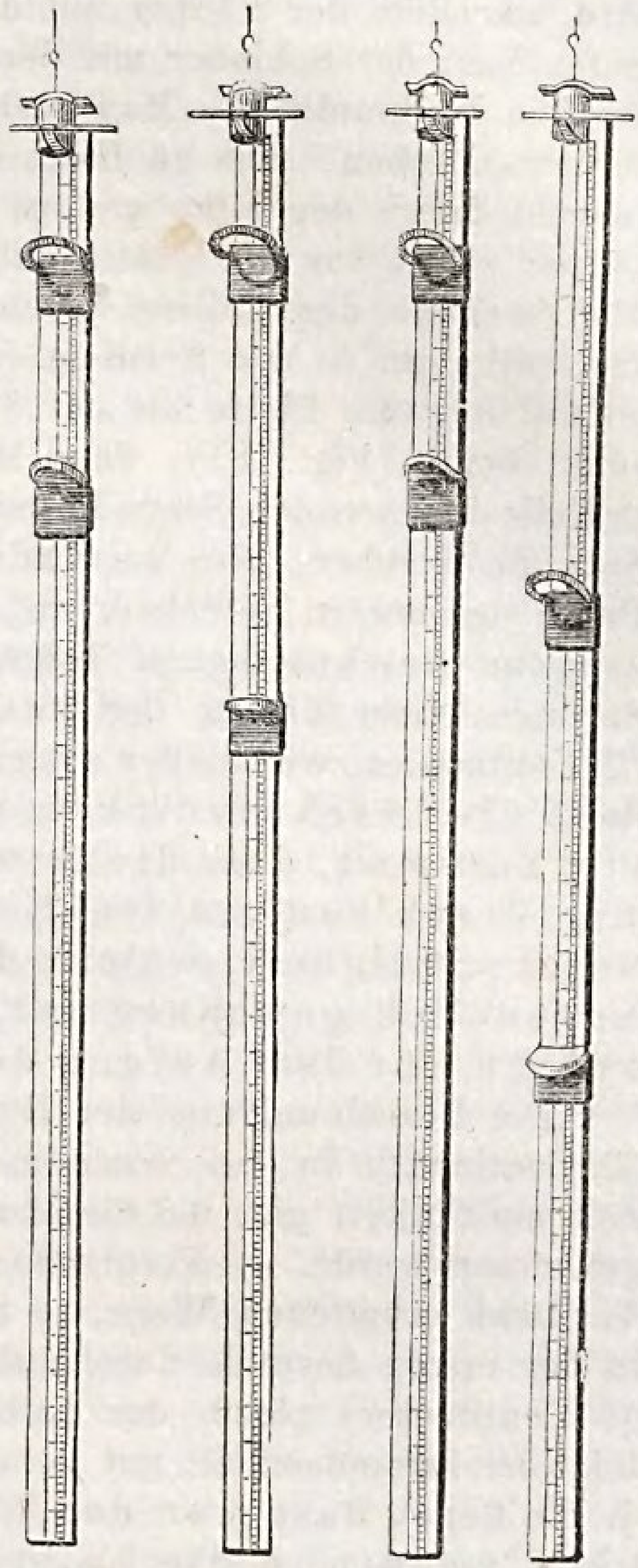


Fig. 182. Fig. 183. Fig 184. Fig. 185.

Um die Geschwindigkeit des unter der Wirkung des Uebergewichtes fallenden Körpers nach einer, zwei, drei Secunden seines Falls zu finden, darf man nur den Schieber mit dem Ring so stellen, dass er das Uebergewicht nach einer, zwei, drei Secunden, vom Anfang der Bewegung an gerechnet, zurückhält, und hierauf den Weg bestimmen, welcher, nachdem die Bewegung gleichförmig geworden ist, in einer Secunde durchlaufen wird. Der Versuch kann auf folgende Art ausgeführt werden. Man stellt zunächst den Ring so, dass das Uebergewicht abgenommen

wird, nachdem der Körper mit demselben 16 Centimeter durchlaufen hat; der Schieber mit der Platte wird 48 Centimeter unter dem Nullpunkt des Maassstabes befestigt (Fig. 184). Dann wird man sehen, dass zu Ende der ersten Secunde das Uebergewicht durch den Ring und zu Ende der zweiten Secunde der Körper selbst von der Platte aufgehalten wird. Die in der ersten Secunde des Fallens gewonnene Geschwindigkeit ist also 32 Centimeter in der Secunde. Hierauf schiebt man den Ring bis auf 64, die Platte bis auf 128 Centimeter unter den Nullpunkt herab (Fig. 185); dann hält der Ring das Uebergewicht zu Ende der zweiten Secunde zurück, und der Körper stösst eine Secunde nachher, also am Ende der dritten Secunde, auf der Platte des untern Schiebers auf. Die nach zwei Secunden gewonnene Geschwindigkeit beträgt also 64 Centimeter in der Secunde, oder die in der zweiten Secunde allein gewonnene 32 Centimeter, wie in der ersten. So überzeugt man sich leicht, dass die Geschwindigkeit in jeder Secunde um gleich viel zunimmt, dass die Bewegung also eine gleichförmig beschleunigte ist (§. 15), und dass folglich die Geschwindigkeit, welche der Körper in irgend einem Augenblick gewonnen hat, der Zeit proportional ist, welche seit dem Anfang der Bewegung verflossen ist.

Die Beschleunigung der Bewegung war in unserem Beispiel 32 Centimeter in der Secunde. Diese Beschleunigung mit der Zeit multiplicirt gibt die Geschwindigkeit, welche in dieser Zeit gewonnen wurde. — Vergleichen wir damit die bei dem ersten Versuche erhaltenen Wege, so bemerken wir zunächst, dass der in der ersten Secunde durchlaufene (in unserem Beispiel gleich 16 Centimeter) gleich der halben Beschleunigung ist. Daraus folgt im Zusammenhalt mit dem Satze am Schlusse des vorigen §. die Regel, dass man den Weg in irgend einer Zeit erhält, wenn man die halbe Beschleunigung mit dem Quadrat der Zeit multiplicirt. Ist also, wie in unseren Versuchen, die Beschleunigung 32 Centimeter, die halbe also 16, so ist der in 5 Secunden durchlaufene Weg gleich $16 \times 25 = 400$ Centimeter.

Aber nicht blos der in der ersten, sondern überhaupt der in irgend einer Zeit durchlaufene Weg ist gleich der halben Geschwindigkeit, welche am Ende dieser Zeit, von der Ruhe aus gerechnet, gewonnen wurde, multiplicirt mit dieser Zeit. So wird nach obigem Beispiel in 5 Secunden der Weg von 400 Centimeter zurückgelegt. Die zu Ende

dieser Zeit gewonnene Geschwindigkeit ist $5 \times 32 = 160$ Centimeter. Multiplicirt man ihre Hälfte, 80, mit der Zeit 5, so erhält man ebenfalls 400. Nun ist die Hälfte der zu irgend einer Zeit von der Ruhe aus gewonnenen Geschwindigkeit gleich dem Mittel aus der Anfangs- (Null) und Endgeschwindigkeit des Körpers. Nach Obigem ergibt sich, dass man für die Berechnung des Weges dieses Mittel der Geschwindigkeit nur mit der Zeit multipliciren, also annehmen darf, dass sich der Körper während dieser Zeit mit jener mittleren Geschwindigkeit gleichförmig bewegte.

Ein anderes interessantes Resultat erhält man durch folgende Betrachtung: Die gewonnene Geschwindigkeit ist nach oben gleich der Beschleunigung multiplicirt mit der Zeit; das Quadrat der Geschwindigkeit also gleich dem Quadrat der Beschleunigung multiplicirt mit dem Quadrat der Zeit. In 5 Secunden ist die bei einer Beschleunigung von 32 Centimeter gewonnene Geschwindigkeit $32 \times 5 = 160$ Centimeter; das Quadrat derselben $= 160 \times 160 = 25600$, oder auch gleich $32 \times 32 \times 5 \times 5$. Nun ist die halbe Beschleunigung multiplicirt mit dem Quadrat der Zeit ($\frac{1}{2} \times 32 \times 5 \times 5 = 400$) gleich dem zurückgelegten Weg. Folglich ist die doppelte Beschleunigung mal dem zurückgelegten Weg ($2 \times 32 \times 16 \times 5 \times 5 = 64 \times 400 = 25600$) gleich dem Quadrat der Geschwindigkeit oder die Geschwindigkeit selbst gleich der Quadratwurzel aus der doppelten Beschleunigung multiplicirt mit dem Weg, und umgekehrt der Weg gleich dem Quadrat der Geschwindigkeit dividirt durch die doppelte Beschleunigung. Wenn daher, um bei unserem Beispiel stehen zu bleiben, bei einer mit gleichförmiger Beschleunigung von 32 Centimeter in der Secunde ausgeführten Bewegung der Weg 400 Centimeter zurückgelegt wurde, so ist das Quadrat der gewonnenen Geschwindigkeit $2 \times 32 \times 400 = 25600$ und die Geschwindigkeit selbst die Quadratwurzel hieraus $= 160$ Centimeter. Umgekehrt ist der Weg, welcher zurückgelegt werden musste, bis die Endgeschwindigkeit 160 Centimeter erreicht war, gleich $\frac{160 \times 160}{2 \times 32} = 400$ Centimeter.

Die in den beiden vorhergehenden Paragraphen gefundenen Gesetze lassen sich sehr einfach in algebraischen Formeln ausdrücken. Es bezeichne b die Beschleunigung der gleichförmig beschleunigten Bewegung, so ist nach einer Secunde die Geschwindigkeit des Körpers b, nach zwei Secunden $2b$, nach drei $3b$ u. s. w. nach t Secunden

$$v = bt.$$

Der während der ersten Secunde durchlaufene Weg ist gleich der halben Beschleunigung, $\frac{1}{2}b$. In 2 Secunden ist der Weg viermal, in 3 Secunden 9mal, in t Secunden t^2mal so gross, also, wenn wir denselben mit s bezeichnen,

$$s = \frac{1}{2}bt^2.$$

Die Vergleichung dieser mit der vorigen Formel ergibt

$$s = \frac{1}{2}vt.$$

Aus der ersten Formel folgt endlich noch $v^2 = b^2t^2 = 2b \times \frac{1}{2}bt^2$, und vergleicht man dies mit der zweiten, so folgt

$$v^2 = 2bs \text{ und } v = \sqrt{2bs}$$

und umgekehrt

$$s = \frac{v^2}{2b}.$$

§. 115. Um die vorhergehenden Lehren auf den **freien Fall** der Körper anwenden zu können, ist es nothwendig, die Beschleunigung dieser Bewegung zu wissen. Ein Mittel, diese zu erhalten, wäre etwa das, dass man einen Stein oder besser eine Bleikugel von einem Thurme mit bekannter Höhe hinabfallen liesse und mit Hilfe einer guten Uhr die während des Fallens verstrichenen Secunden zählte. Man weiss dann, die durchfallene Höhe ist gleich der halben Beschleunigung mal dem Quadrate der Zeit, also die halbe Beschleunigung gleich der durchfallenen Höhe dividirt durch das Quadrat der Zeit.

Dieses Mittel ist allerdings wegen der grossen Geschwindigkeit, mit welcher der Körper herabfällt, wegen des Luftwiderstandes etc. etc. nicht sehr genau; es wird auch nicht wirklich angewendet, sondern sollte hier nur einen Weg zeigen, auf dem die Bestimmung der gesuchten Grösse möglich ist. Wir werden bald sehen, wie dieselbe mittelst Pendelbeobachtungen auf das Genaueste gefunden werden kann. Das Resultat dieser Messungen wollen wir jedoch schon jetzt angeben: Es ist die Beschleunigung der beim freien Fall eines Körpers gemachten gleichförmig beschleunigten Bewegung (in Paris) gleich 9,8088 Meter oder 33,6078 bayerische, oder 31,2528 preussische, oder 31,0300 österreichische, oder 32,1816 englische, oder 30,1954 Pariser Fuss in der Secunde. Man nennt diese Grösse gewöhnlich kurz die **Beschleunigung der Schwere** und bezeichnet sie allgemein mit dem Buchstaben g. — Dieser Werth, doppelt genommen und mit der durchfallenen Höhe multiplicirt, gibt nach dem vorigen §. das Quadrat der erreichten Geschwindigkeit, die Quadratwurzel daraus also die Geschwindigkeit selbst, welche man kurz die jener Höhe entsprechende Geschwindigkeit nennt. Die

folgende Tabelle enthält die auf diese Weise für eine grössere Anzahl von Werthen der Fallhöhe berechneten Resultate im Metermaasse.

Tabelle 8. Fallhöhen und Fallgeschwindigkeiten.

Fall-Höhe.	Gewonnene Geschwindigkeit.	Fall-Höhe.	Gewonnene Geschwindigkeit.	Fall-Höhe.	Gewonnene Geschwindigkeit.
m.	m.	m.	m.	m.	m.
0,25	2,214	9	13,288	19	19,306
0,50	3,132	10	14,006	20	19,808
1	4,429	11	14,690	30	24,260
2	6,264	12	15,343	40	28,013
3	7,672	13	15,970	50	31,319
4	8,858	14	16,572	60	34,308
5	9,904	15	17,154	70	37,057
6	10,849	16	17,717	80	39,616
7	11,718	17	18,262	90	42,019
8	12,528	18	18,791	100	14,292

Um die speciell für den freien Fall giltigen Formeln zu erhalten darf man nur in denen des vorigen §. für den Buchstaben b den g mit seinem besonderen oben angegebenen Werth setzen.

§. **116.** Wenn ein Körper, der bereits eine bestimmte Geschwindigkeit besitzt, in derselben Richtung wie diese eine gleichförmig beschleunigte Bewegung beginnt, so setzt sich diese letztere mit der gleichförmigen Bewegung, die er in Folge der ursprünglichen Geschwindigkeit allein ausführen würde, in der einfachen Weise nach dem Princip zusammen, welches wir am Schlusse des §. 17 kennen gelernt haben. Die in Folge der gleichförmig beschleunigten Bewegung gewonnene Geschwindigkeit fügt sich einfach zu der ursprünglichen hinzu, und der im Ganzen zurückgelegte Weg ist gleich der Summe der beiden Wege, welche der Körper 1) in Folge der ursprünglichen Geschwindigkeit mit gleichförmiger Bewegung, 2) in Folge der gleichförmig beschleunigten Bewegung, jeden für sich, zurücklegen würde. Der in irgend einer Zeit zurückgelegte Weg ist demnach auch gleich dem Product aus dem Mittel der am Anfang und Ende dieser Zeit vorhandenen Geschwindigkeiten in dieser Zeit.

Ist also z. B. die ursprüngliche Geschwindigkeit des Körpers 20 Meter, und seine Beschleunigung in der Secunde 6 Meter, so besitzt er nach 5 Secunden eine Geschwindigkeit von $20 + 5 \times 6 = 50$ Meter und legt in dieser Zeit den Weg

$20 \times 5 + \frac{1}{2} \times 6 \times 25 = 100 + 75 = 175$ Meter zurück, welcher Weg auch erhalten wird, wenn man das Mittel aus der Anfangs- und Endgeschwindigkeit, 20 und 50 Meter, also 35 Meter, mit der Zeit, 5, multiplicirt. Endlich ist das Quadrat der Endgeschwindigkeit, vermindert um das Quadrat der Anfangsgeschwindigkeit ($50^2 - 20^2 = 2500 - 400 = 2100$) gleich dem Product aus der doppelten Beschleunigung, 12, in den zurückgelegten Weg, 175, also gleich demselben Product, dem oben, bei der von der Ruhe aus beginnenden gleichförmig beschleunigten Bewegung das Quadrat der Endgeschwindigkeit gleich war.

Ein Beispiel einer solchen Bewegung erhält man, wenn man einen Stein mit bestimmter Geschwindigkeit vertikal abwärts wirft. Die Beschleunigung dabei ist natürlich die der Schwere, 9,8088 Meter.

Um diese Sätze wieder in Formeln zu geben, bezeichne c die ursprüngliche Geschwindigkeit des Körpers; im Uebrigen behalten wir dieselbe Bezeichnung bei, wie bisher (s. Ende des §. 114). Dann ist die Geschwindigkeit nach Verfluss der Zeit t

$$v = c + bt$$

und der zurückgelegte Weg:

$$s = ct + \frac{1}{2} bt^2,$$

oder auch

$$s = \frac{1}{2} (c + v) t.$$

Ausserdem folgt leicht:

$$v^2 - c^2 = 2bs.$$

§. **117.** Wenn ein schwerer Körper vertikal in die Höhe geworfen wird, so ist es, nachdem er einmal durch den Impuls der Hand eine gewisse Geschwindigkeit bekommen hat, im weiteren Verlauf der Bewegung allein die Schwerkraft, welche, entgegengesetzt seiner Anfangsgeschwindigkeit, auf ihn wirkt und in Folge dessen seine Geschwindigkeit fort und fort verkleinert, bis dieselbe Null wird. In diesem Augenblick hat er die grösste Höhe, auf welche er sich erheben kann, erreicht. Er bleibt einen Augenblick stehen und kehrt dann um, um in der, in den vorigen §§. beschriebenen Weise abwärts zu fallen. Folgende Versuche können dazu dienen, jene verzögerte Bewegung des Körpers näher zu studiren.

Denken wir uns, es seien an dem Maassstab der *Atwood*'schen Fallmaschine zwei Schieber mit Ringen angebracht und so gestellt, dass der an dem einen Ende des Fadens angehängte Körper durch den einen und der am andern Ende aufgehängte durch den andern Ring hindurchgehen kann (Fig. 186 und 187). Um die beiden Körper in Bewegung zu setzen, legt man auf

den zur Rechten ein Uebergewicht, wodurch sich derselbe abwärts bewegt (Fig. 186). Zu gleicher Zeit steigt aber der andere, und in dem Augenblick, wo der erste durch den zur Rechten befindlichen Ring geht und sein Uebergewicht auf demselben zurücklässt, geht der zweite durch den Ring zur Linken und nimmt dort ein ebenso grosses Uebergewicht auf, welches vorher auf diesen Ring gelegt worden ist (Fig. 187). Die Bewegung dauert in Folge der gewonnenen Geschwindigkeit fort, aber während sie unter der Wirkung des ersten Uebergewichtes eine beschleunigte war, verzögert sie sich mehr und mehr unter der Wirkung des zweiten, das sich unter denselben Verhältnissen befindet, wie ein in die Höhe geworfener Körper. Die beiden Körper bewegen sich also in dem nämlichen Sinne fort, bis ihre Geschwindigkeit durch den Widerstand, welchen das zweite Uebergewicht leistet, vollständig zerstört ist. Alsdann nehmen sie, nach einem Augenblick des Stillstehens, eine Bewegung im entgegengesetzten Sinne an; das Gewicht zur Linken geht mit beschleunigter Bewegung abwärts und lässt bald sein Uebergewicht auf dem Ring zurück, durch welchen es hindurch gehen muss; zugleich nimmt das Gewicht zur Rechten das seinige, welches es im Abwärtsgehen zurückgelassen hatte, wieder auf; die Bewegung verzögert sich also von Neuem, bis sie wieder einen Augenblick ganz aufhört, um dann wieder im entgegengesetzten Sinne zu beginnen u. s. f.

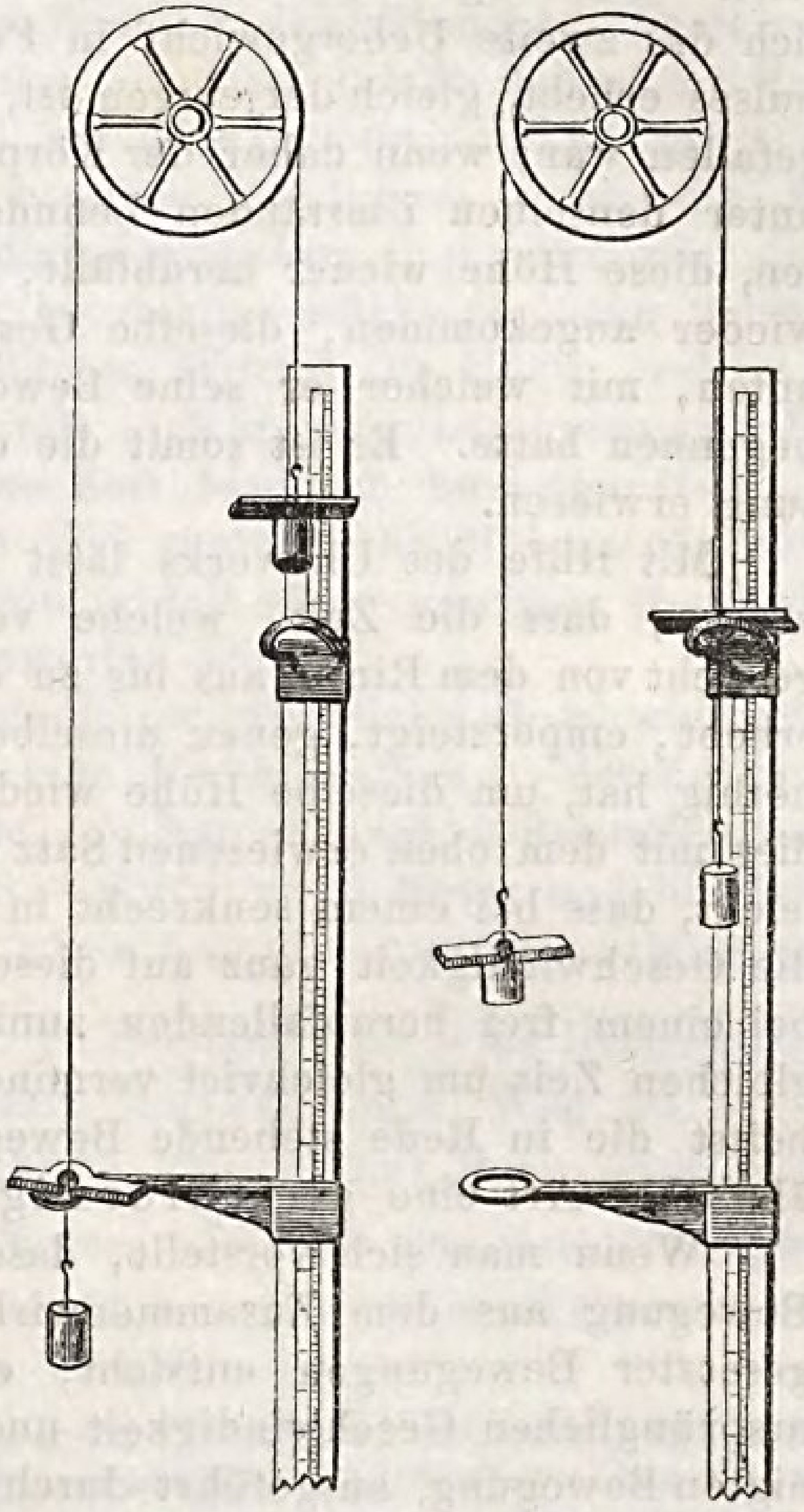


Fig. 186. Fig. 187.

Wenn das Uebergewicht zur Rechten, während es abwärts geht, auf dem entsprechenden Ring zurückgelassen wird, so be-

sitzt es eine gewisse Geschwindigkeit, welche der Höhe entspricht, die es herabgefallen ist. In demselben Moment ergreift der Körper zur Linken, welcher mit der nämlichen Geschwindigkeit aufwärts geht, das andere Uebergewicht und ertheilt ihm augenblicklich dieselbe Geschwindigkeit, die er selbst besitzt. Dieses zweite Uebergewicht wird also mit derselben Geschwindigkeit in die Höhe geworfen, welche das erste im Fallen gewonnen hatte. Nun ergibt der Versuch, dass die Höhe, bis zu welcher sich das zweite Uebergewicht in Folge des ihm ertheilten Impulses erhebt, gleich derjenigen ist, von welcher das erste herabgefallen war; wenn daher der Körper zur Linken, der sich ganz unter denselben Umständen befindet wie vorhin der zur Rechten, diese Höhe wieder herabfällt, so erhält er, bei dem Ring wieder angekommen, dieselbe Geschwindigkeit von oben nach unten, mit welcher er seine Bewegung von unten nach oben begonnen hatte. Es ist somit die oben ausgesprochene Behauptung erwiesen.

Mit Hilfe des Uhrwerks lässt sich ausserdem leicht nachweisen, dass die Zeit, welche verfliesst, bis das eine Uebergewicht von dem Ringe aus bis zu der Höhe, auf welche es sich erhebt, emporsteigt, genau dieselbe ist als diejenige, welche er nöthig hat, um dieselbe Höhe wieder herabzufallen. Wenn man dies mit dem oben erwiesenen Satz zusammenhält, so ergibt sich leicht, dass bei einem senkrecht in die Höhe geworfenen Körper die Geschwindigkeit ganz auf dieselbe Weise abnimmt, wie sie bei einem frei herabfallenden zunimmt; sie wird also in jeder gleichen Zeit um gleichviel vermindert, und aus diesem Grunde heisst die in Rede stehende Bewegung, sowie jede andere von ähnlicher Art eine gleichförmig verzögerte Bewegung.

Wenn man sich vorstellt, dass die gleichförmig verzögerte Bewegung aus dem Zusammenwirken zweier direct entgegengesetzter Bewegungen entsteht, einer gleichförmigen mit der ursprünglichen Geschwindigkeit und einer gleichförmig beschleunigten Bewegung, ausgeführt durch die constant wirkende Kraft, welche die Bewegung des Körpers fortwährend verzögert, so dienen obige Versuche nur wieder dazu, um das Princip des §. 17 zu bestätigen, wornach jede Bewegung unabhängig von der anderen stattfindet und fortgesetzt wird. Betrachtet man die in Rede stehende Bewegung aus diesem Gesichtspunkt, so ist es leicht, die Geschwindigkeit und den Weg nach irgend einer Zeit zu finden. Die Geschwindigkeit zu irgend einer Zeit ist offenbar gleich der ursprünglichen, vermindert um diejenige,

welche der Körper in Folge der Beschleunigung, die ihm die constant wirkende Kraft ertheilt, in jener Zeit erreichen würde. Diese Beschleunigung stellt sich also in Wirklichkeit als Verzögerung dar, aber es ist jetzt einleuchtend, warum man für diese letztere trotzdem den Namen Beschleunigung beibehält. — Der Weg des Körpers in irgend einer Zeit ist gleich dem Weg, den er in Folge der ursprünglichen Geschwindigkeit in gleichförmiger Bewegung zurückgelegt haben würde, vermindert um den Weg, den er in derselben Zeit mit gleichförmig beschleunigter Bewegung zurücklegen kann. — Man erhält daher die Zeit, welche der Körper braucht, bis seine Geschwindigkeit Null wird, wenn man die ursprüngliche Geschwindigkeit durch die Beschleunigung, die Geschwindigkeitsabnahme in der Secunde, dividirt, und den Weg, den er bis dahin zurücklegt (beim Beispiel des vertikal aufwärts gerichteten Wurfes die Höhe, welche er erreicht), wenn man ihn mit gleichförmig beschleunigter Bewegung die eben gefundene Zeit hindurch bewegen lässt. Es gibt daher die Tab. 8 (Seite 227) zugleich die Höhe, auf welche sich ein Körper erhebt, wenn er mit einer gewissen Geschwindigkeit vertikal aufwärts geworfen wird.

Wenn also ein Körper die ursprüngliche Geschwindigkeit von 50 Meter besitzt und eine Beschleunigung (Verzögerung) von 5 Meter in der Secunde, so hat er nach 6 Secunden noch die Geschwindigkeit von $50 - 6 \times 5 = 20$ Meter und bis dahin einen Weg gleich $50 \times 6 - \frac{1}{2} \times 5 \times 6 \times 6 = 300 - 90 = 210$ Meter gemacht. Nach $\frac{50}{5} = 10$ Secunden ist seine Geschwindigkeit Null und der bis dahin zurückgelegte Weg $50 \times 10 - \frac{1}{2} \times 5 \times 10 \times 10 = 500 - 250 = 250$ Meter oder gleich $\frac{1}{2} \times 5 \times 10 \times 10 = 250$ Meter. Ein mit der Geschwindigkeit 17,154 Meter vertikal in die Höhe geworfener Körper erhebt sich 15 Meter hoch (Tab. 8, S. 227).

Nach Obigem ist es nun auch leicht, die Formeln für die gleichförmig verzögerte Bewegung aufzustellen. Behalten wir dieselbe Bezeichnung wie zu Ende des vorigen §. bei, so ist die nach Verfluss der Zeit t noch vorhandene Geschwindigkeit

$$v = c - bt$$

und der zurückgelegte Weg

$$s = ct - \frac{1}{2} bt^2.$$

Die ganze Zeit T, welche verfliesst, bis die Geschwindigkeit Null wird, ist

$$T = \frac{c}{b},$$

und setzt man dies in die vorige Formel ein, so erhält man den ganzen zurückgelegten Weg

$$S = \frac{c^2}{b} - \frac{1}{2}\frac{c^2}{b} = \frac{1}{2}\frac{c^2}{b},$$

also genau halb so gross als der, welchen der Körper mit gleichförmiger Geschwindigkeit c allein in dieser Zeit zurücklegen würde, und genau so gross als derjenige, welchen der Körper in der nämlichen Zeit mit gleichförmig beschleunigter Bewegung von der Beschleunigung b durchläuft.

§. 118. **Der Morin'sche Apparat.** — Man kann die Gesetze des freien Falls der Körper auch noch mittelst des folgenden Apparats beobachten, dessen Einrichtung von *Morin* angegeben wurde.

Ein vertikaler Cylinder AA (Fig. 188) kann sich um seine Achse drehen und erhält durch ein Uhrwerk B, welches durch ein Gewicht C in Bewegung gesetzt wird, um diese Achse eine gleichförmige Rotationsbewegung. Wir gehen nicht näher auf die Beschreibung der einzelnen Theile, aus denen dieser Mechanismus zusammengesetzt ist, ein, wir können hier auch noch nicht vollständig klar machen, auf welche Weise eine vollkommen gleichförmige Bewegung des Cylinders erreicht wird. Es möge hier genügen, zu sagen, dass in der ersten Zeit, nachdem der Cylinder der Wirkung des Gewichtes C frei überlassen wurde, die Bewegung desselben sich beschleunigt, dass sie aber bald in Folge eines oben angebrachten Windrades sehr genau gleichförmig wird. Diese Gleichförmigkeit erkennt man mittelst des Geräusches, welches eine schwache Lamelle *a* von Fischbein hören lässt, der successive die vier Arme des oben erwähnten Windrades begegnen, welches sich in jedem Augenblick mit einer Geschwindigkeit, proportional derjenigen des Cylinders AA, herumbewegt.

Vor dem Cylinder AA ist ein schwerer Körper D aufgehängt, der mit einem Bleistift versehen ist, dessen Spitze gegen die Oberfläche des Cylinders leicht angedrückt wird. Wenn dieser Körper losgelassen wird, so fällt er längs des Cylinders herab; bei dieser Bewegung wird er durch zwei dünne Metalldrähte geleitet, welche vertikal ausgespannt sind und durch Oehren gehen, welche zu beiden Seiten des Körpers D angebracht sind; sie verhindern, dass sich dieser Körper durch irgend eine fremde Ursache von der Vertikallinie entfernt. Um den Körper D auszulösen und dadurch seinen Fall beginnen zu lassen, reicht es hin, an einer Schnur b zu ziehen, die zu diesem Behuf angebracht ist.

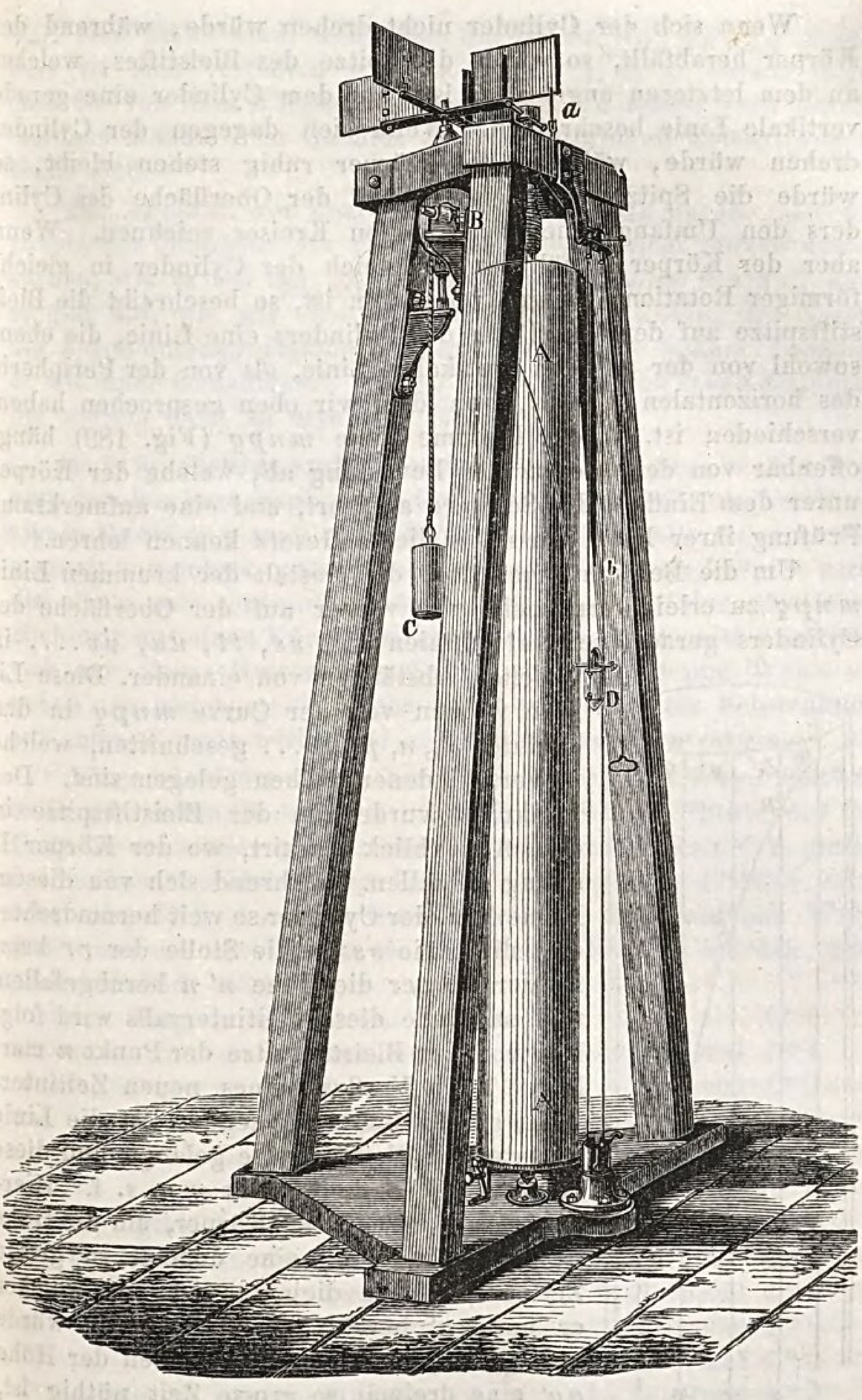


Fig. 188

Wenn sich der Cylinder nicht drehen würde, während der Körper herabfällt, so würde die Spitze des Bleistiftes, welcher an dem letzteren angebracht ist, auf dem Cylinder eine gerade vertikale Linie beschreiben. Wenn sich dagegen der Cylinder drehen würde, während der Körper ruhig stehen bleibt, so würde die Spitze des Bleistifts auf der Oberfläche des Cylinders den Umfang eines horizontalen Kreises zeichnen. Wenn aber der Körper D fällt und zugleich der Cylinder in gleichförmiger Rotationsbewegung begriffen ist, so beschreibt die Bleistiftspitze auf der Oberfläche des Cylinders eine Linie, die ebensowohl von der geraden vertikalen Linie, als von der Peripherie des horizontalen Kreises, von dem wir oben gesprochen haben, verschieden ist. Diese krumme Linie $mnpq$ (Fig. 189) hängt offenbar von dem Gesetz der Bewegung ab, welche der Körper unter dem Einfluss der Schwere ausführt, und eine aufmerksame Prüfung ihrer Form muss uns dieses Gesetz kennen lehren.

Um die Betrachtungen über die Gestalt der krummen Linie $mnpq$ zu erleichtern, zieht man vorher auf der Oberfläche des Cylinders gerade vertikale Linien rr, ss, tt, uu, vv.... in gleichen Abständen von einander. Diese Linien werden von der Curve $mnpq$ in den Punkten m, n, p, q.... geschnitten, welche in verschiedenen Höhen gelegen sind. Der Punkt m wurde von der Bleistiftspitze in dem Augenblick markirt, wo der Körper D anfing zu fallen. Während sich von diesem Moment an der Cylinder so weit herumdrehte, dass die Linie ss an die Stelle der rr kam, ist der Körper die Höhe $n'n$ herabgefallen, und am Ende dieses Zeitintervalls wird folglich von der Bleistiftspitze der Punkt n markirt. Nach Verfluss eines neuen Zeitintervalls, gleich dem vorgehenden, ist die Linie tt unter die Bleistiftspitze gelangt, und diese markirt daher den Punkt p u. s. f. Hiernach ist klar, dass der Körper, um die Höhe pp' herabzufallen, eine doppelt so grosse Zeit braucht als diejenige ist, in welcher er um nn' herabfällt, und ebenso würde man finden, dass zum Durchfallen der Höhe qq' eine dreimal so grosse Zeit nöthig ist, als zum Durchfallen der Höhe nn' erforderlich

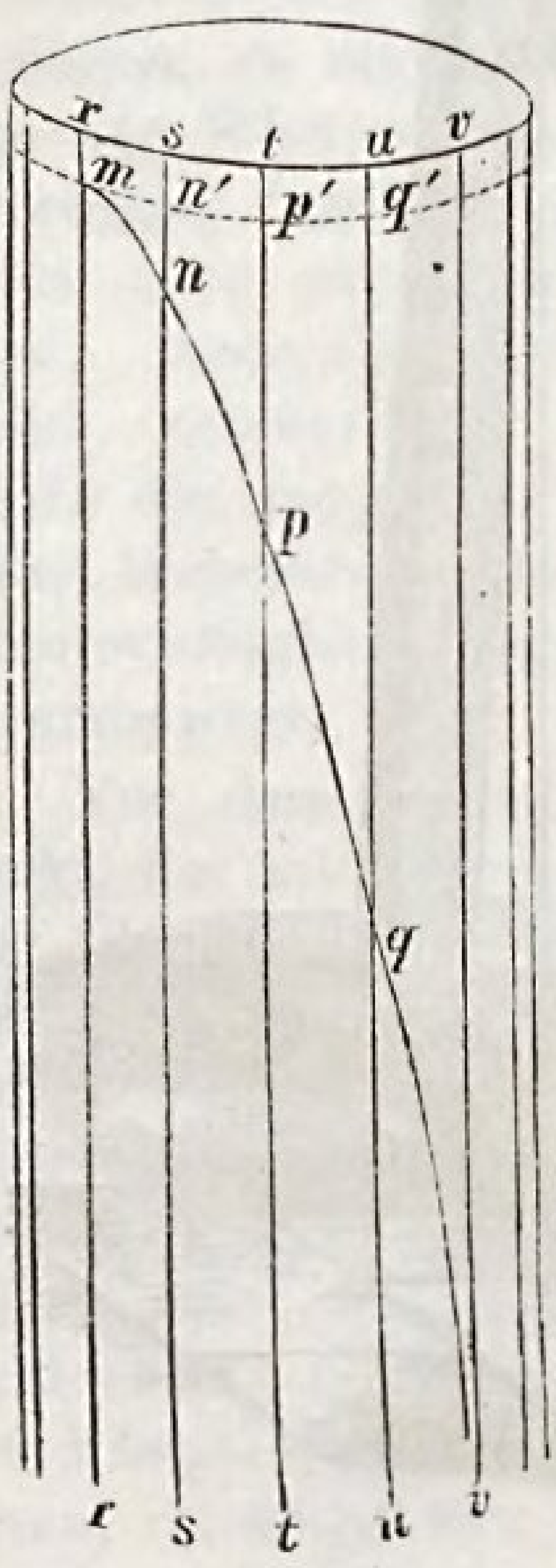


Fig. 189.

war. Nun findet man, wenn man die Höhen nn', pp', qq' misst, dass sie sich verhalten wie die Zahlen 1, 4, 9, woraus folgt, dass die von dem Körper D seit dem Beginn seines Falls durchlaufenen Räume dem Quadrat der dazu nöthigen Zeiten proportional sind.

Der Apparat, von dem wir oben gesprochen haben, lässt das Gesetz der Zunahme der Geschwindigkeiten nicht direct untersuchen, wie es bei der *Atwood*'schen Fallmaschine der Fall war; er gibt nur, wie wir eben auseinandergesetzt haben, das Gesetz der durchlaufenen Räume. Aber dieses letzte Gesetz bestätigt er mit einer Genauigkeit, welche mit der *Atwood*'schen Maschine bei weitem nicht zu erreichen ist.

§. 119. **Bewegende Kraft.** — Wir haben in den vorhergehenden Paragraphen die Gesetze der gleichförmig beschleunigten Bewegung und speciell die des freien Falls als einer Bewegung entwickelt, welehe durch eine Kraft hervorgebracht wird, die allein, mit constanter Stärke und immer in der nämlichen Richtung auf einen Körper wirkt. Sehen wir nun welche Schlüsse sich aus diesen Gesetzen in Bezug auf die Art und Weise ergeben, in welcher eine solche Kraft wie hier die Schwerkraft auf einen Körper wirkt und seine Bewegung hervorbringt.

Wenn ein Körper frei herabfällt, so ist der Weg, welchen er in der ersten Secunde durchläuft, gleich der Hälfte der am Ende der ersten Secunde gewonnenen Geschwindigkeit, d. h. gleich der halben Beschleunigung 9,^{m}8088, also gleich 4,^{m}9044 oder sehr nahe 4,^{m}9. Aus dem Gesetz, dass die durchlaufenen Wege dem Quadrate der Zeiten, welche dazu gebraucht wurden, proportional sind, folgt:

der Weg in der ersten Secunde ist 4,^{m}9
„ „ „ den zwei ersten Secunden ist 4mal 4,^{m}9
„ „ „ „ drei „ „ „ 9mal 4,^{m}9
„ „ „ „ vier „ „ „ 16mal 4,^{m}9
„ „ „ „ fünf „ „ „ 25mal 4,^{m}9
u. s. w.

Daraus ergibt sich aber leicht:

der Weg in der ersten Secunde ist 4,^{m}9
„ „ „ „ zweiten „ „ . . 3mal 4,^{m}9
„ „ „ „ dritten „ „ . . 5mal 4,^{m}9
„ „ „ „ vierten „ „ . . 7mal 4,^{m}9
„ „ „ „ fünften „ „ . . 9mal 4,^{m}9
u. s. w.

Aus dem Gesetz, dass die Geschwindigkeit in irgend einem Augenblick der Zeit proportional ist, welche seit dem Anfang der Bewegung verflossen ist, folgt die gewonnene Geschwindigkeit

am Anfang der zweiten Secunde gleich . 2 mal 4,^{m}9
„ „ „ dritten „ „ . 4 mal 4,^{m}9
„ „ „ vierten „ „ . 6 mal 4,^{m}9
„ „ „ fünften „ „ . 8 mal 4,^{m}9
u. s. w.

Durch Vergleichung dieser Resultate mit einander ergibt sich:

1) In der ersten Secunde durchläuft der Körper in Folge der Wirkung der Schwere einen Weg von 4,^{m}9.

2) In der zweiten Secunde würde er, in Folge der bereits gewonnenen Geschwindigkeit 2 mal 4,^{m}9 durchlaufen, auch wenn die Schwere nicht wirken würde; er durchläuft aber in Wirklichkeit 3 mal 4,^{m}9. Die fortgesetzte Wirkung der Schwere hat also zur Folge, dass der Körper in der zweiten Secunde 4,^{m}9 mehr durchläuft als ohne dieselbe.

3) In der dritten Secunde würde der Körper in Folge der bereits gewonnenen Geschwindigkeit 4 mal 4,^{m}9 zurücklegen, auch wenn die Schwere nicht mehr wirken würde; er durchläuft aber in Wirklichkeit 5 mal 4,^{m}9. Indem also die Schwere fortfährt, auf den Körper zu wirken, veranlasst sie denselben, während der dritten Secunde 4,^{m}9 mehr zu durchlaufen, als er ohne sie gethan haben würde, u. s. w.

Während so die Schwere in ununterbrochener Weise auf einen fallenden Körper einwirkt, veranlasst sie denselben, in jeder Secunde 4,^{m}9 mehr zurückzulegen, als wenn er sich während dieser Secunde allein mit derjenigen Geschwindigkeit bewegt hätte, welche er zu Anfang derselben bereits gewonnen hatte.

Wir haben ferner schon oben gesehen, dass bei der Fallbewegung eines Körpers die Geschwindigkeit desselben in jeder Secunde um gleichviel, nämlich um 9,^{m}8 zunimmt, aus welchem Grunde diese Bewegung ja eine gleichförmig beschleunigte heisst. Diese Vermehrung muss aber ebenfalls lediglich der auf den Körper wirkenden Kraft zugeschrieben werden, denn wenn dieselbe in irgend einem Augenblick zu wirken aufhören würde, so würde sich der Körper in Folge seiner Trägheit mit der bereits gewonnenen Geschwindigkeit gleichförmig fortbewegen. Daraus folgt also, dass die Schwere in jeder Secunde die Geschwindigkeit des Körpers immer um gleichviel vermehrt, welches auch die Geschwindigkeit ist, die der Körper schon besitzt.

Hält man dieses letzte Ergebniss mit dem bereits vorhin gefundenen zusammen, so muss man daraus schliessen, dass bei der Bewegung eines frei fallenden Körpers die Schwere immer in derselben Weise wirkt, welches auch die Geschwindigkeit ist, die der Körper bereits gewonnen hat.

Was hier in Bezug auf die Schwerkraft insbesondere entwickelt wurde, gilt für alle Kräfte, welcher Natur sie auch sein mögen, denn es können, wie wir schon früher gesehen haben, die Wirkungen aller Kräfte auf einen Körper mit denen der Schwerkraft verglichen werden. Wenn also irgend eine Kraft auf einen Körper wirkt, so ist ihre Wirkung von der Geschwindigkeit, welche der Körper in irgend einem Augenblick schon besitzt, ganz unabhängig; sie bringt, so lange sie die nämliche Grösse und Richtung behält, in derselben Zeit stets die gleiche Vermehrung der Geschwindigkeit hervor, oder die Bewegung, welche sie erzeugt, ist eine gleichförmig beschleunigte. In welcher Weise die Grösse der Beschleunigung dieser Bewegung von der Grösse der Kraft abhängt, durch welche sie hervorgebracht wird, soll uns der folgende Paragraph lehren. Zuvor aber noch folgende Bemerkung.

Das Gesetz, welches wir oben aufgestellt haben, scheint in gewissen Fällen mit Thatsachen, die man sehr leicht beobachten kann, in Widerspruch zu stehen. Wenn man z. B. ein Fass, das auf gut geebnetem horizontalem Boden liegt, mit der Hand fortrollt, so kann man ihm Anfangs eine immer schnellere Bewegung ertheilen. Aber man fühlt recht wohl, dass man zu Anfang der Bewegung eine grössere Wirkung auf dass Fass hervorzubringen vermag als später. In dem Maasse, als sich das Fass schneller bewegt, kann man seine Bewegung immer weniger und weniger beschleunigen, und es kommt bald eine Zeit, wo sie nicht weiter beschleunigt werden kann. Aber nach einiger Ueberlegung erkennt man leicht, dass zwischen diesem Beispiele und der Bewegung eines frei fallenden Körpers ein wesentlicher Unterschied stattfindet. Man sieht in der That, dass mit wachsender Geschwindigkeit des Fasses der Druck, welchen man mit der Hand gegen dasselbe auszuüben vermag, kleiner und kleiner wird, und wenn das Fass die grösste Geschwindigkeit erreicht hat, welche der Mensch im Laufen annehmen kann, so ist es offenbar nicht mehr möglich, einen Druck gegen das Fass auszuüben und seine Geschwindigkeit noch weiter zu erhöhen. Mit

der Vermehrung der Geschwindigkeit des Fasses findet also zugleich eine Verminderung der Grösse der Kraft statt, welche auf dasselbe wirkt, und dieselbe kann desshalb die Geschwindigkeit, je grösser sie wird, um so weniger beschleunigen. Wenn die Stärke des durch die Hand ausgeübten Druckes immer dieselbe bliebe, so würde sie auch immer die gleiche Vermehrung der Geschwindigkeit in der Secunde hervorbringen. Das Fass, indem es immer schneller und schneller fortrollt, entzieht sich mehr und mehr der Wirksamkeit der Hand, während ein frei herabfallender Körper, wie sehr auch seine Geschwindigkeit anwächst, stets der gleichen Wirkung der Schwere unterliegt.

§. 120. Die Beschleunigungen, welche einem und demselben Körper durch zwei Kräfte, die genau unter denselben Verhältnissen auf ihn wirken, ertheilt werden, sind der Grösse dieser Kräfte proportional. Dieser wichtige Satz kann auf folgende Weise mittelst der *Atwood*'schen Fallmaschine bewiesen werden.

Man hängt an den beiden Enden des Fadens der *Atwood*'schen Maschine zwei gleich schwere Körper, jeden von 240 Gramm z. B., auf und legt auf denjenigen von ihnen, welcher sich längs der getheilten Leiste herabbewegt, ein Uebergewicht von 20 Gramm (Fig. 190). Durch dieses Uebergewicht werden die beiden Körper in Bewegung gesetzt, und man kann auf dieselbe Weise wie oben die Geschwindigkeit, welche sie nach Verfluss der ersten Secunde gewonnen haben, ihre Beschleunigung also, bestimmen.

Hierauf ersetzt man die beiden Körper von 240 Gramm durch zwei andere, von denen jeder 230 Gramm wiegt, und das Uebergewicht von 20 Gramm durch ein anderes von 40 Gramm (Fig. 191) und bestimmt nochmals die Geschwindigkeit, welche von diesen neuen Körpern unter der Wirkung des neuen Uebergewichts nach Verfluss von einer Secunde der Bewegung gewonnen wird.

In jedem dieser beiden Fälle wiegen die Körper, welche sich zusammen bewegen, 500 Gramm; man kann also sagen, dass ein und derselbe Körper in dem ersten Fall durch eine Kraft von 20, in dem zweiten durch eine Kraft von 40 Gramm in Bewegung gesetzt wird. Nun ergibt der Versuch, dass die in der ersten Secunde gewonnene Geschwindigkeit in dem zweiten Fall zweimal so gross ist als in dem ersten. Wenn man einen dritten Versuch machen würde, wo die Körper, welche zusammen 500 Gramm schwer sind, durch ein Uebergewicht von 60 Gramm in Bewegung gesetzt würden, so würde man die nach einer Secunde erlangte Ge-

schwindigkeit dreimal so gross als in dem ersten Fall finden. Dadurch ist also bestätigt, dass die Beschleunigungen, welche einem und demselben Körper durch verschiedene Kräfte ertheilt werden, die unter den nämlichen Umständen auf ihn wirken, diesen Kräften proportional sind.

§. 121. In §. 110 haben wir gesehen, dass alle Körper gleich schnell fallen. Es folgt daraus, dass, um irgend einen Körper, indem man ihn frei herabfallen lässt, eine Beschleunigung von 9,^{m}8 in der Secunde zu ertheilen, eine Kraft gleich dem Gewichte dieses Körpers erforderlich ist; da aber, wie schon wiederholt bemerkt wurde, alle Kräfte in Bezug auf ihre Wirkung mit der Schwerkraft verglichen werden können, so können wir allgemein sagen, dass, um einem Körper die Beschleunigung von 9,^{m}8, in der Secunde zu ertheilen, eine Kraft gleich seinem Gewichte erforderlich ist. Nehmen wir nun dieses mit dem Satze, den wir im vorhergehenden Paragraphen nachgewiesen haben, zusammen, so wird es uns leicht, folgende zwei Hauptfragen zu beantworten: 1) Wie gross ist die Beschleunigung, welche einem bestimmten Körper ertheilt wird, indem eine Kraft von gegebener Grösse auf ihn wirkt? 2) Wie gross muss die Kraft sein, welche einem bestimmten Körper eine gewisse Beschleunigung ertheilen, oder, was auf dasselbe hinauskommt, welche ihm in einer gegebenen Zeit eine gewisse Geschwindigkeit geben soll? Wir wollen

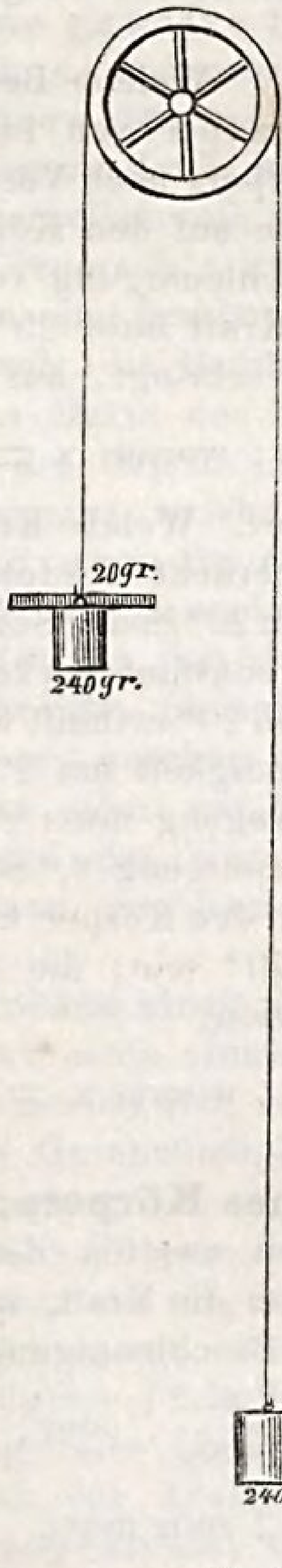


Fig. 190.

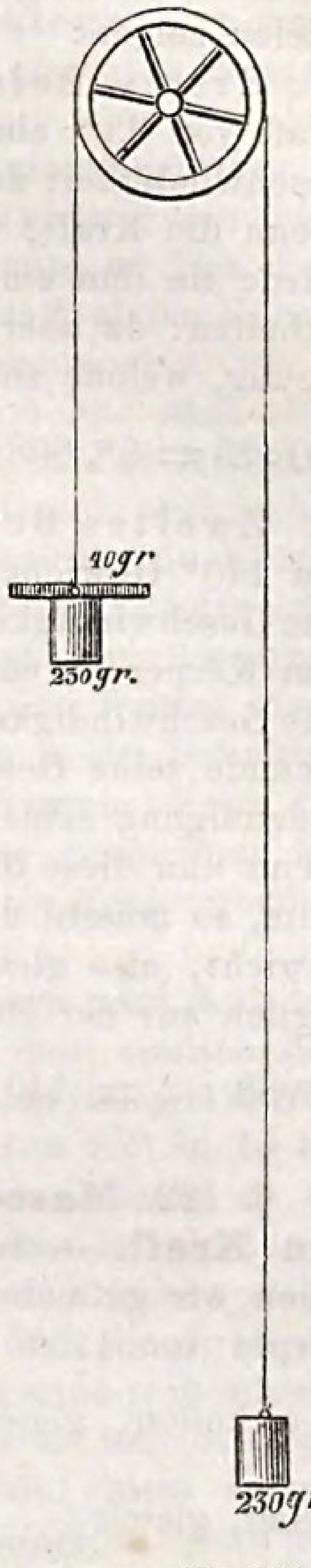


Fig. 191.

die Beantwortung dieser beiden Fragen an folgenden zwei Beispielen zeigen:

Erstes Beispiel. Welche Beschleunigung ertheilt eine Kraft von 25^k einem Körper von 140^k; wie gross ist also die Geschwindigkeit des Körpers nach Verfluss von einer Secunde? — Wenn die Kraft, welche auf den Körper wirkt, 140^k wäre, so würde sie ihm eine Beschleunigung von $9^m, 8088$ in der Secunde ertheilen; da aber die Kraft bloss 25^k ist, so wird die Beschleunigung, welche sie hervorbringt, aus der Proportion gefunden:

$$140 : 25 = 9^m, 8088 : x \text{ ; woraus } x = \frac{9^m, 8088 \times 25}{140} = 1^m, 752.$$

Zweites Beispiel. Welche Kraft muss an einem Körper von 140^k Gewicht angebracht werden, um ihm in 10 Secunden eine Geschwindigkeit von 20^m in der Secunde zu ertheilen. — Wenn dem Körper durch die constant wirkende Kraft in 10 Secunden eine Geschwindigkeit von 20^m ertheilt werden soll, so muss in jeder Secunde seine Geschwindigkeit um 2^m zunehmen, d. h. die Beschleunigung seiner Bewegung muss 2^m in der Secunde betragen. Wenn nun diese Beschleunigung $9,^m 8088$ in der Secunde betragen sollte, so müsste die auf den Körper wirkende Kraft gleich seinem Gewicht, also gleich 140^k sein; die gesuchte Kraft ergibt sich folglich aus der Proportion:

$$9,8088 : 2 = 140^k : x\text{; woraus } x = \frac{140^k \times 2}{9,8088} = 28^k,546.$$

§. 122. **Masse eines Körpers; Grösse der bewegenden Kraft.** — In dem zweiten der obigen beiden Beispiele haben wir gefunden, dass die Kraft, welche im Stande ist, einem Körper von 140^k eine Beschleunigung von 2^m in der Secunde zu ertheilen, gleich $\frac{140^k \times 2}{9,8088}$, oder, was auf dasselbe hinauskommt, gleich $\frac{140^k}{9,8088} \times 2$ sein muss. Diese Kraft wird also erhalten, indem man das Gewicht des Körpers durch 9,8088, d. h. durch die Zahl, welche wir oben die Beschleunigung der Schwere genannt und mit g bezeichnet haben, dividirt und den Quotienten mit der Zahl multiplicirt, durch welche die Beschleunigung des Körpers ausgedrückt wird. Diesen Quotienten aus dem Gewicht eines Körpers in die Beschleunigung der Schwere g hat man die Masse des Körpers genannt, und wenn man die Bedeutung dieses Wortes festhält, so ergibt sich aus dem Resultat des zweiten der obigen Beispiele der Satz:

Die Grösse der bewegenden Kraft, welche einem bestimmten Körper eine gewisse Beschleunigung ertheilen soll, ist gleich dem Product aus der Masse des Körpers in diese Beschleunigung.

Daraus folgt offenbar, dass die Kraft, welche einem Körper eine bestimmte Beschleunigung ertheilen soll, um so grösser sein muss, je grösser die Masse des Körpers ist; und ebenso ist klar, dass die Geschwindigkeit, welche eine bestimmte Kraft einem Körper in einer gewissen Zeit ertheilt, die Beschleunigung also, um so kleiner wird, je grösser die Masse des Körpers ist. Man sieht also, dass die Bedeutung des Wortes Masse in der Mechanik ungefähr dieselbe ist, als diejenige, welche man ihm im praktischen Leben zuschreibt. Man sagt schon für gewöhnlich, ein Körper habe mehr oder weniger Masse, je nachdem man grössere oder geringere Schwierigkeit findet, um ihm eine bestimmte Bewegung zu ertheilen. Diese gewöhnliche Bedeutung des Wortes Masse findet sich auch noch, wie wir gesehen haben, in der Definition, die wir oben gegeben haben, aber das Unbestimmte dieses Begriffs ist verschwunden, und das Wort Masse bezeichnet uns künftig etwas, welches genau gemessen und in Zahlenwerthen ausgedrückt werden kann.

§. 123. **Bewegungsgrösse eines Körpers und Antrieb einer Kraft.** — Kehren wir noch einmal zu dem zweiten Beispiel des §. 121 zurück. Es handelt sich in diesem Beispiel darum, einem Körper von 140^k die Geschwindigkeit von 20^m in 10 Secunden, also eine Beschleunigung von 2^m in der Secunde, zu ertheilen. Wenn aber derselbe Körper die Geschwindigkeit von 20^m schon in 5 oder gar schon in $2^1/_2$ Secunden erhalten sollte, so ist klar, dass die Beschleunigung, welche ihm die Kraft ertheilen müsste, 4 oder bezüglich 8^m in der Secunde sein müsste, also doppelt und beziehungsweise 4mal so gross als im ersten Fall. Nun wird die Grösse der Kraft, welche einem Körper eine bestimmte Beschleunigung ertheilen soll, erhalten, wenn man die Masse des Körpers mit dieser Beschleunigung multiplicirt. Wenn wir daher in unserem Beispiel für die Grösse der Kraft $28,^k546$ gefunden haben, so würde in dem Fall, wo der Körper dieselbe Geschwindigkeit schon in 5 oder $2^1/_2$ Secunden erhalten sollte, eine Kraft von 2mal $28^k,546$ gleich $57^k,092$ oder beziehungsweise von 4mal $28^k,546$ gleich $114^k,184$ nöthig sein. **Wenn also eine Kraft einem Körper eine bestimmte Geschwindigkeit ertheilen soll, so muss ihre Grösse umgekehrt proportional der Zeit sein, während welcher**

sie zu diesem Behufe auf den Körper wirkt. Je kleiner diese Zeit ist, desto grösser muss die Kraft werden, um dem Körper die verlangte Geschwindigkeit zu ertheilen, und es leuchtet daher ein, dass es unmöglich ist, einen in Ruhe befindlichen Körper augenblicklich in eine Bewegung von gegebener Geschwindigkeit zu versetzen; es wäre hiezu eine unendlich grosse Kraft erforderlich. Wenn wir daher auch manchmal sehen, dass ein Körper sehr schnell von der Ruhe aus in Bewegung versetzt wird, wie dies z. B. der Fall ist, wenn er einen Stoss oder Schlag erhält, so dürfen wir daraus doch nicht schliessen, dass die Kraft nur momentan gewirkt habe; sie hätte sonst unendlich gross sein müssen. In allen Fällen, wo einem Körper eine bestimmte Geschwindigkeit ertheilt werden soll, ist eine bestimmte Zeit dazu erforderlich, eine längere, wenn die wirkende Kraft nur klein, eine kürzere, wenn sie gross ist.

Wenn daher gefragt wird, welche Kraft erforderlich ist, um einem bestimmten Körper eine bestimmte Geschwindigkeit zu ertheilen, so ist diese Frage so lange unvollständig und daher nicht zu beantworten, als nicht die Zeit angegeben wird, in welcher es geschehen soll. Ist diese Angabe noch gemacht, so muss man die gegebene Geschwindigkeit durch die Zeit dividiren und mit diesem Quotienten die Masse des Körpers multipliciren, um die Grösse der bewegenden Kraft zu erhalten. Wenn man folglich die Masse des Körpers mit der Geschwindigkeit selbst multiplicirt, so ist dieses Product nicht gleich der bewegenden Kraft, sondern gleich dieser Kraft multiplicirt, mit der Zeit ihrer Wirksamkeit. Man hat dem Product aus der Masse eines Körpers in die Geschwindigkeit, welche er besitzt, den Namen „Grösse der Bewegung“ oder „Bewegungsgrösse“ des Körpers, und dem Product aus der Grösse einer Kraft in die Zeit, durch welche sie gewirkt hat, den Namen „Antrieb“ der Kraft gegeben. Wenn wir diese Benennungen festhalten, so können wir nach dem Obigen folgenden Satz aussprechen: Die Bewegungsgrösse eines Körpers, der eine bestimmte Geschwindigkeit besitzt, ist gleich dem Antrieb der Kraft, welche nöthig war, ihm diese Geschwindigkeit zu ertheilen.

Eine Kanonenkugel, 10^{k} schwer, habe eine Geschwindigkeit von 400^{m} in der Secunde erhalten, nachdem von dem Augenblick an, wo sie den Zustand der Ruhe verliess, bis zu dem Augenblick, wo sie jene Geschwindigkeit erreicht hat, eine Kraft auf

sie wirkte, welche innerhalb dieses Zeitraums als constant angenommen wird. —

Die Masse dieser Kugel ist gleich $\frac{10}{9,8088} = 1,019$, und folglich ihre Bewegungsgrösse, nachdem sie ihre Geschwindigkeit von 400^m erlangt hat, gleich $1,019 \times 400 = 407,6$. Diese Zahl ist also auch gleich dem Antrieb der Kraft, welche ihr jene Geschwindigkeit ertheilt hat, also gleich dem Product aus dieser Kraft in die Zeitdauer ihrer Wirkung. Je nachdem also die Wirkung der Kraft 1 oder $^1/_{10}$ oder $^1/_{100}$ Secunde gedauert hat, musste ihre Grösse 407,6 oder 4076 oder 40760 Kilogramm betragen.

Wenn die Kugel in dem Augenblick, wo ihre Geschwindigkeit noch 400^m beträgt, auf einen Widerstand, gegen eine Mauer oder einen Erdwall z. B., stösst und dadurch zur Ruhe kommt, so wird dadurch ihre ganze Bewegungsgrösse 407,6 vernichtet. Offenbar nun muss dieser Widerstand, den wir als constant annehmen, so gross sein, dass er, in umgekehrter Richtung als Kraft wirkend, der Kugel in derselben Zeit die Geschwindigkeit von 400^m ertheilen würde, in welcher er dieselbe vernichtet hat. Es muss folglich der Antrieb des Widerstandes, der eine bestimmte Bewegungsgrösse vernichtet (diesen Ausdruck, analog mit dem bei der Kraft, für das Product aus dem Widerstand mit der Zeitdauer seiner Wirkung genommen) gleich der vernichteten Bewegungsgrösse sein. Je nachdem also die Kugel durch den Widerstand in $^1/_{10}$, $^1/_{100}$, $^1/_{1000}$ Secunde zur Ruhe kommt, muss die Grösse dieses Widerstandes 4076 oder 40760 oder 407600 Kilogramm betragen.

Wenn wir an einem Körper beobachten, dass seine Geschwindigkeit bald grösser bald kleiner wird, so müssen wir daraus schliessen, dass diese Veränderungen der Bewegung durch bewegende Kräfte oder durch Widerstände hervorgebracht werden, von denen die ersteren in dem nämlichen, die letzteren in dem entgegengesetzten Sinne der Bewegung wirken. Aus dem Vorhergehenden folgt leicht, dass die Zunahme der Bewegungsgrösse in dem Fall, wo die Geschwindigkeit grösser wird, gleich dem Antrieb der Kraft ist, welche die Zeit hindurch, in welcher diese Zunahme stattgefunden hat, mit constanter Stärke auf den Körper wirkte. Ebenso ist die Abnahme der Bewegungsgrösse in dem Fall, wo die Geschwindigkeit des Körpers kleiner wird, gleich dem Antrieb des Widerstandes, welcher die Zeit hindurch,

in welcher diese Verminderung stattgefunden hat, mit constanter Stärke der Bewegung sich entgegensetzte.

§. 124. **Lebendige Potenz und Arbeit.** — Wenn wir in dem vorhergehenden Paragraphen gesehen haben, dass jede Kraft eine bestimmte Zeit braucht, um einem Körper eine bestimmte Geschwindigkeit zu ertheilen, so folgt daraus von selbst, dass die Kraft den Körper auch eine gewisse Strecke hindurch bewegen muss, bis er die Geschwindigkeit erreicht, die er erhalten soll. Die Grösse dieses Weges erhält man nach §. 96, wenn man die halbe Geschwindigkeit mit der Zeit, die nöthig war um sie hervorzubringen, multiplicirt. Nun haben wir im vorigen Paragraphen die mit dieser Zeit multiplicirte Kraft den Antrieb dieser Kraft genannt; wenn man daher diesen Antrieb mit der halben Geschwindigkeit, welche dem Körper ertheilt wurde, multiplicirt, so ist die dadurch erhaltene Zahl nichts anderes als das Product aus der Grösse dieser Kraft in den Weg, welchen sie den Körper durchlaufen machte, um ihm die in Rede stehende Geschwindigkeit zu ertheilen, d. h. die Arbeit, welche die Kraft zu diesem Behufe zu leisten hatte. Wenn man in gleicher Weise die Bewegungsgrösse, welche der Körper besitzt, nachdem er die bestimmte Geschwindigkeit erreicht hat, das Product aus seiner Masse in diese Geschwindigkeit, mit der halben Geschwindigkeit multiplicirt, so erhält man eine Zahl, gleich dem halben Product, aus der Masse in das Quadrat der Geschwindigkeit des Körpers. Nun sind nach dem vorigen Paragraphen Antrieb der Kraft und Bewegungsgrösse des Körpers einander gleich, folglich sind auch die Zahlen, welche man erhält, wenn man jede dieser beiden Grössen mit der halben Geschwindigkeit multiplicirt, gleich gross, und daraus folgt also der Satz:

Die Arbeit, welche eine Kraft leistet, indem sie einen Körper, um ihm von der Ruhe aus eine bestimmte Geschwindigkeit zu ertheilen, eine gewisse Strecke weit fortbewegt, ist gleich dem halben Product aus der Masse des Körpers in das Quadrat jener Geschwindigkeit.

Es wird gut sein, sogleich darauf aufmerksam zu machen, dass hiebei von allen Widerständen, als Reibung etc., die sich der Bewegung des Körpers entgegensetzen könnten, abgesehen wurde; die auf den Körper wirkende Kraft soll blos die Trägheit desselben zu überwinden, d. h. blos die Aufgabe haben, dem Körper eine bestimmte Geschwindigkeit zu ertheilen. Wenn ausserdem noch Widerstände zu überwinden sind, so ist dazu

noch eine besondere Kraft und eine besondere Arbeitsleistung erforderlich.

Um einem Eisenbahnzug von 300000 Kilogramm Gewicht, dessen Masse also gleich $\frac{300000}{9,8088} = 30585$ ist, eine Geschwindigkeit von 12 Meter in der Secunde zu ertheilen, hat die hiezu nöthige Kraft eine Arbeit von $\frac{1}{2} \times 30585 \times 144 = 2202120$ Kilogrammmeter zu leisten. Wenn jene Geschwindigkeit in einer halben Minute oder in 30 Secunden erreicht wurde, so war der in dieser Zeit durchlaufene Weg gleich $\frac{1}{2} \times 12 \times 30 = 180$ Meter, und folglich die Kraft, welche die Locomotive aufzuwenden hatte, gleich $\frac{2202120}{180} = 12234^{k}$. Diese Kraft wurde lediglich zur Erzeugung der Geschwindigkeit verwendet, und wenn ausserdem Widerstände der Bewegung zu überwinden sind, so ist hiezu noch eine besondere Kraft erforderlich. Natürlich braucht jene erste Kraft nur so lange wirksam zu sein, als die Geschwindigkeit des Zuges vergrössert werden soll; von da an, wo diese Geschwindigkeit gleich bleibt, hat die Locomotive blos noch die Widerstände der Reibung etc., welche sich beständig der Bewegung entgegensetzen, zu überwinden.

Wenn ein Körper, der durch eine auf ihn wirkende Kraft eine bestimmte Geschwindigkeit erhalten hat, sich selbst überlassen wird, so würde er sich, wenn keine Hindernisse vorhanden wären, gleichförmig fortbewegen. Durch Widerstände, welche sich seiner Bewegung entgegensetzen, wird seine Geschwindigkeit vermindert und zuletzt ganz Null. Die gänzliche Vernichtung der Geschwindigkeit kann aber, wie wir im vorigen Paragraphen gesehen haben, nicht plötzlich vor sich gehen; es ist immer eine gewisse Zeit erforderlich, bis der Körper zur Ruhe kommt und daraus folgt, dass sich der Körper, wie gross auch die Hindernisse sind, welche sich seiner Bewegung entgegensetzen, immer noch eine bestimmte Strecke weit bewegen wird, bis er stehen bleibt. Er überwindet also in Folge seiner gewonnenen Geschwindigkeit die Widerstände, die sich ihm entgegensetzen, längs eines bestimmten Weges, d. h. er leistet eine Arbeit. Nun haben wir gesehen, dass der Antrieb der Widerstände gleich der Bewegungsgrösse des Körpers, welche sie vernichten, ist. Daraus folgt, dass die Arbeit, welche der Körper leistet, indem er diese Widerstände über-

windet, die Widerstandsarbeit, ebenfalls gleich dem halben Producte aus der Masse des Körpers in das Quadrat seiner Geschwindigkeit ist. Das Product aus der halben Masse eines Körpers in das Quadrat seiner Geschwindigkeit repräsentirt also nicht blos die Arbeit, welche geleistet werden musste, um dem Körper jene Geschwindigkeit zu geben, sondern es stellt auch die Arbeit vor, welche der Körper, wenn er sich überlassen wird, zu leisten vermag. Es wird folglich die Arbeit, welche abgesehen von der Ueberwindung anderer Widerstände lediglich dazu verwendet wird, dem Körper eine bestimmte Geschwindigkeit zu ertheilen, gleichsam in dem Körper aufgesammelt und kann zu einer andern Zeit zu irgend einem Zweck, zur Ueberwindung von Widerständen etc. verwendet werden. Und wenn der Körper wieder zur Ruhe gekommen ist, so hat er genau die Arbeit, welche am Anfang dazu verwendet wurde, um ihm eine bestimmte Geschwindigkeit zu ertheilen, in Folge dieser erhaltenen Geschwindigkeit aus sich selbst wieder geleistet. Man nennt daher das halbe Product aus der Masse eines Körpers in das Quadrat der Geschwindigkeit, die er besitzt, welches Product die in dem Körper aufgesammelte Arbeit misst, die lebendige Potenz *) des Körpers und kann nun folgenden Satz aussprechen:

Die lebendige Potenz eines Körpers, der eine bestimmte Geschwindigkeit besitzt, ist gleich der Arbeit, welche nöthig war, um dem Körper diese Geschwindigkeit zu ertheilen, oder auch gleich der Arbeit, welche der Körper selbst, in Folge seiner Geschwindigkeit, die er besitzt, leisten kann, indem er Widerstände, die sich seiner Bewegung entgegensetzen, überwindet.

Die lebendige Potenz des Eisenbahnzuges, von dem wir

*) Dieser Ausdruck wurde erst in neuerer Zeit von französischen Mechanikern eingeführt; früher nannte man gewöhnlich das ganze Product aus der Masse eines Körpers in das Quadrat seiner Geschwindigkeit seine lebendige Kraft. Da aber die Bezeichnung Kraft für diese Grösse ungeeignet ist und zudem das ganze Product selbst keine Bedeutung hat, sondern nur seine Hälfte, so haben wir es vorgezogen, die neue Bezeichnung anzunehmen. Das Wort „Potenz", das so viel als Vermögen, Arbeitsvermögen bedeutet, bezeichnet recht gut die Bedeutung der damit gemeinten Grösse, und das Beiwort „lebendig" dient, wie *Coriolis* sich ausdrückt, zur Unterscheidung der Arbeit, welche aus einer erworbenen Geschwindigkeit wieder zu gewinnen ist, von derjenigen, welche aus zusammengedrückten Federn oder irgend einem andern Motor wieder gewonnen werden kann.

oben gesprochen haben, beträgt 2202120^{km}. Derselbe ist also, sich selbst überlassen, im Stande, eine Arbeit von 2202120^{km} zu leisten. Wenn wir daher z. B. finden, dass er, nachdem die Locomotive ganz aufgehört hat zu wirken, noch eine Strecke von 1200^{m} durchläuft, so können wir daraus schliessen, dass die Widerstände $\frac{2202120}{1200} = 1835,^{k}1$ betragen. Umgekekrt, wenn wir wüssten, dass die Widerstände 2000^{k} betrügen, so könnten wir daraus schliessen, dass sich der Zug von dem Augenblick an, wo die Maschine aufgehört hat zu wirken, noch $\frac{2202120}{2000} = 1101,06$ Meter weit bewegen würde.

§. 125. Wenn die Geschwindigkeit eines Körpers bald grösser, bald kleiner wird, so ist aus dem Vorhergehenden klar, dass in dem ersten Fall die aus der Vergrösserung der Geschwindigkeit hervorgehende Vermehrung der lebendigen Potenz des Körpers gleich ist der Arbeitsleistung der bewegenden Kraft, welche die Geschwindigkeit vergrössert. Im zweiten Fall ist ebenso die aus der Verkleinerung der Geschwindigkeit entspringende Verminderung der lebendigen Potenz des Körpers gleich der Arbeit, welche zur Ueberwindung der Widerstände geleistet werden musste, welche die Geschwindigkeit verminderten.

Fasst man daher ganz im Allgemeinen eine beliebige ungleichförmige, vorläufig aber noch geradlinig fortschreitende Bewegung eines Körpers in's Auge, so wird dieselbe unter dem Einflusse beliebig wechselnder Kräfte und Widerstände hervorgebracht. Bezeichnen wir kurz die Arbeit, welche die Kräfte, indem sie auf den Körper wirken, leisten, (die Bewegungsarbeit) als die „von dem Körper aufgenommene Arbeit“, und diejenige, welche der Körper leistet, indem er die Widerstände überwindet, (die Widerstandsarbeit) als die „von ihm geleistete“, so sind folgende Sätze klar: Der Ueberschuss der von dem Körper aufgenommenen über die von ihm geleistete Arbeit in einer bestimmten Zeit ist gleich dem Zuwachs, welchen seine lebendige Potenz erfährt, also gleich der lebendigen Potenz am Ende, vermindert um die am Anfang dieser Zeit. Umgekehrt ist der Ueberschuss der von dem Körper geleisteten über die von ihm aufgenommene Arbeit gleich der Verminderung seiner lebendigen Potenz in derselben Zeit, also gleich der Differenz zwischen den lebendigen Potenzen am Anfang und am Ende dieser Zeit. Nun ist die lebendige Potenz gleich dem halben Product aus der

Masse des Körpers in das Quadrat seiner Geschwindigkeit, also bei einem und demselben Körper allein von der Geschwindigkeit abhängig. Sowie wir also die Geschwindigkeit eines Körpers wachsen sehen, so schliessen wir daraus, dass währenddem die Arbeit der bewegenden Kräfte die der widerstehenden überwiegt. Der Ueberschuss wird als lebendige Potenz gleichsam in dem Körper aufgesammelt, und wenn wir dann später finden, dass die Geschwindigkeit wieder abnimmt, so überwiegt jetzt die Arbeit der Widerstände die der bewegenden Kräfte; es wird die vorhin als lebendige Potenz aufgesammelte Arbeit wieder verbraucht, und die lebendige Potenz verringert sich mit der Geschwindigkeit. Es mag dabei die Bemerkung nicht überflüssig sein, dass es nicht gerade nothwendig ist, dass alle Kräfte und Widerstände die Richtung der geradlinig fortschreitenden Bewegung des Körpers haben. Man darf nur ihre Arbeit bei der Rechnung auf diese Richtung beziehen (§. 37).

Beispiele für die allgemeine Bewegung, wie wir sie in diesem Paragraphen besprochen haben, finden sich viele. Wenn die Locomotive einen Eisenbahnzug in Bewegung setzt, so hat sie ausser der Arbeit, welche zur Ueberwindung der passiven Widerstände (Reibung, Luftwiderstand etc.) erforderlich ist, auch noch diejenige aufzuwenden, welche zur Vermehrung der Geschwindigkeit, zur Ansammlung von lebendiger Potenz in dem ganzen Zug gebraucht wird. Ist das Gewicht des Zuges wieder 300000^k (vgl. das Beispiel im vorigen Paragraphen), seine Masse also $\frac{300000}{9{,}8088} = 30585$, und soll er eine Geschwindigkeit von 12 Meter in der Secunde, also eine lebendige Potenz gleich $\frac{1}{2} \times 30585 \times 12 \times 12 = 2202120$ erhalten, so ist dazu eine Arbeit von ebensoviel Kilogrammmetern erforderlich, um welche die Leistung der Maschine grösser sein muss, als zur Ueberwindung der Widerstände allein gehört. So lange dann die Geschwindigkeit gleich gross bleibt, hat die Maschine blos die passiven Widerstände zu überwinden, und wenn hierauf die Geschwindigkeit abnimmt, so wird ein Theil der aufgesammelten lebendigen Potenz auf Ueberwindung der Widerstände verwendet. Wenn in der Nähe einer Station der Dampf in der Maschine abgesperrt wird, so ist es allein die lebendige Potenz, welche die zur Ueberwindung der Widerstände nothwendige Arbeit liefert. Dadurch wird sie selber mit der Geschwindigkeit immer kleiner und kleiner, und wenn dann endlich der Zug zum Stillstand gebracht ist, so ist alle lebendige Potenz, die beim Anfahren aufgesam-

melt wurde, wieder verbraucht. Es ist also die Arbeit, welche zur Erzeugung von Geschwindigkeit verwendet wird, keine verlorene; sie wird allemal wieder ersetzt, wenn die Geschwindigkeit wieder abnimmt.

Die in den beiden vorhergehenden Paragraphen entwickelten Sätze können in sehr einfachen algebraischen Formeln ausgedrückt werden. Wenn man mit m die Masse des Körpers bezeichnet, welchem durch eine Kraft P, nachdem sie t Secunden lang auf ihn gewirkt hatte, die Geschwindigkeit v ertheilt wurde, so ist das Product mv die Bewegungsgrösse des Körpers und das Product Pt der Antrieb der Kraft P. Nach §. 123 ist daher

$$mv = Pt.$$

Wenn ferner ausserdem s den Weg bedeutet, den die Kraft P den Körper zurücklegen machte, bis er die Geschwindigkeit v erreicht hatte, so ist die lebendige Potenz des Körpers gleich $\frac{1}{2} mv^2$ und die zur Erzeugung jener Geschwindigkeit nothwendige Arbeit der Kraft Ps. Es ist dann

$$\frac{1}{2} mv^2 = Ps.$$

In Folge seiner lebendigen Potenz überwinde der Körper einen Widerstand Q und lege dabei noch den Weg s' zurück, bis er zur Ruhe kommt, so ist Qs' die von ihm geleistete Arbeit, und nach dem Satze des vorigen Paragraphen hat man wieder

$$\frac{1}{2} mv^2 = Qs'.$$

Bezeichnet endlich v die Geschwindigkeit eines sich ganz unregelmässig bewegenden (aber noch geradlinig fortschreitenden) Körpers zu irgend einer Zeit, v' seine Geschwindigkeit in irgend einem späteren Augenblick, A die Summe der Arbeit, welche die auf ihn wirkenden Kräfte in der Zwischenzeit geleistet haben, also die von ihm aufgenommene Arbeit, W die Summe der Arbeit, welche in derselben Zeit zur Ueberwindung der Widerstände erforderlich war, so ist

$$\frac{1}{2} mv'^2 - \frac{1}{2} mv^2 = A - W.$$

§. 126. Fortschreitende Bewegung eines Körpers im Allgemeinen. — In §. 11 haben wir die fortschreitende Bewegung eines Körpers charakterisirt: sie findet statt, wenn alle seine Punkte genau gleichgestaltete parallele Bahnen beschreiben, sodass seine Bewegung vollständig bestimmt ist, wenn man sie von einem seiner Punkte kennt, und überhaupt der ganze Körper durch einen einzigen materiellen Punkt ersetzt gedacht werden kann, in dem seine ganze Masse vereinigt ist. Welchen Punkt des Körpers man als solchen wählt, ist eigentlich im Allgemeinen gleichgiltig, aber folgende einfache Betrachtung zeigt, dass es in mancher Beziehung vortheilhaft ist, einen besonderen, nämlich den Schwerpunkt des Körpers, zu wählen. Da alle Moleküle des Körpers ganz gleiche Bewegungen ausführen, so kann man sich die Bewegung des Körpers, durch welche Kräfte sie auch

immer hervorgebracht sein mag, dadurch erzeugt denken, dass man sich an den einzelnen Molekülen Kräfte angebracht denkt, eine an jedem, die in jedem Augenblick sämmtlich einander gleich und parallel sind. Man kann dann diese Kräfte, gleichwie die auf die einzelnen Moleküle wirkenden Schwerkräfte, in eine einzige Resultante vereinigen, deren Angriffspunkt der Schwerpunkt ist. Und da man sich in diesem, nach Obigem, wieder die ganze Masse des Körpers vereinigt denken kann, so führt er in diesem Sinne wiederum den Namen Mittelpunkt der Massen (vgl. §. 109).

Aus der eben angestellten Betrachtung folgt aber noch folgendes wichtige Resultat. Da man sich die Bewegung des Körpers auch durch jene, auf die einzelnen Moleküle wirkenden Kräfte erzeugt denken kann, welche durch eine einzige im Schwerpunkt angreifende Resultante ersetzt werden können, so müssen sich sämmtliche wirklich auf den Körper wirkende Kräfte, welche sie auch seien, wenn sie nur eine rein fortschreitende Bewegung desselben hervorbringen, in eine einzige Mittelkraft vereinigen lassen, deren Angriffspunkt der Mittelpunkt der Massen ist. — Umgekehrt, wenn diese Mittelkraft im Schwerpunkt angreift, so kann der Körper nur eine fortschreitende Bewegung machen. Denn man kann sich diese Mittelkraft in eine Menge einzelner gleicher und paralleler Kräfte, deren Angriffspunkte die Moleküle des Körpers sind, zerlegt denken, und diese Kräfte ertheilen den einzelnen Bestandtheilen des Körpers offenbar genau gleiche Bewegungen und dem Körper selbst also eine fortschreitende. — Sobald aber die Mittelkraft P nicht durch den Schwerpunkt des Körpers geht, etwa durch den Punkt A, während S der Schwerpunkt ist (Fig. 192), so kann man sich, ohne ihre Wirkung im mindesten zu beeinträchtigen, im Schwerpunkt zwei ihr gleiche und parallele aber einander entgegengesetzte Kräfte P′, P″ angebracht denken. Die eine, P″, derselben bringt dann sicherlich nur eine rein fortschreitende Bewegung hervor, aber die beiden anderen P und P′, bilden ein Gegenpaar und ertheilen daher zu gleicher Zeit dem Körper eine Drehung.

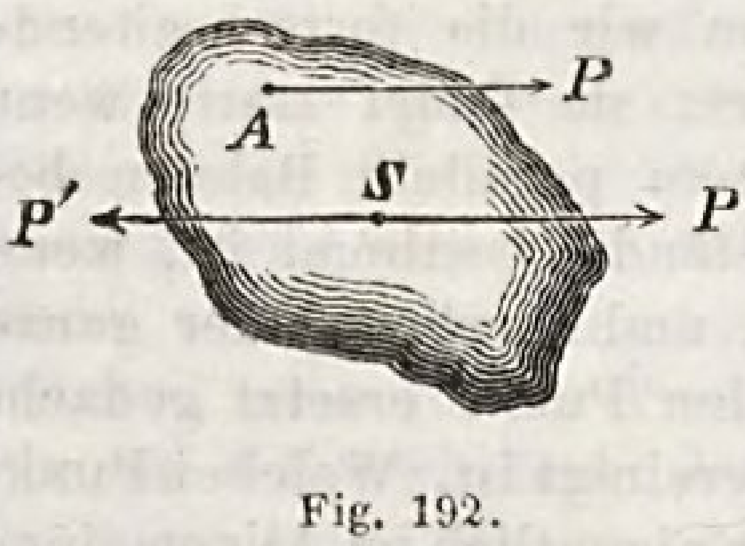


Fig. 192.

Wir werden uns also in der Folge bei einer rein fortschreitenden Bewegung die ganze Masse des Körpers im Schwerpunkt concentrirt denken und die Bewegung dieses Punktes allein ver-

folgen, indem wir uns die Mittelkraft sämmtlicher auf den Körper wirkenden Kräfte daran wirkend denken. Die auf diesem Wege erhaltenen Resultate gelten dann natürlich für die Bewegung eines materiellen Punktes überhaupt, und wir werden sie auch auf jene praktischen Fälle anwenden, wo das Bewegte eigentlich kein materieller Punkt ist, auch keine rein fortschreitende Bewegung macht, wo aber von seiner Ausdehnung abstrahirt und nur einer seiner Punkte ins Auge gefasst wird. So z. B. wenn man die Bahn einer abgeschossenen Kugel verfolgt, oder die Bewegung eines an einem Faden aufgehängten kleinen Körpers etc. etc. (vgl. §. 11).

§. 127. Wenn auf einen solchen Körper, der bereits eine bestimmte Geschwindigkeit besitzt, keine Kraft weiter einwirkt, welche seine Bewegung verändert, so würde er sich gleichförmig und in gerader Linie fortbewegen. Aber von dem Augenblick an, wo er der fortgesetzten Einwirkung einer Kraft unterliegt, bleibt seine Bewegung im Allgemeinen nicht mehr gleichförmig und geradlinig.

Wenn die Kraft, für sich allein oder als Mittelkraft mehrerer Kräfte, fortwährend in der Richtung der ursprünglichen Bewegung des Körpers wirkt, so verändert sie die Richtung seiner Bewegung nicht, sondern allein die Grösse seiner Geschwindigkeit; und zwar wird sie diese Geschwindigkeit vermehren oder vermindern, je nachdem sie im Sinne der ursprünglichen Bewegung oder im entgegengesetzten Sinne wirkt; die Bewegung bleibt geradlinig, aber sie ist nicht mehr gleichförmig. So lange dabei die Grösse der Kraft ebenfalls die nämliche bleibt, bringt sie eine gleichförmig beschleunigte oder verzögerte Bewegung hervor und gelten dafür die Formeln, die wir oben für solche Bewegungen aufgestellt haben. Wenn aber die Kraft bald grösser bald kleiner ist, so ist auch die Beschleunigung, welche sie dem Körper ertheilt, jeden Augenblick anders. Man versteht dann unter der Beschleunigung des Körpers in einem bestimmten Zeitpunkt die Beschleunigung derjenigen gleichförmig beschleunigten oder verzögerten Bewegung, welche er machen würde, wenn die Kraft von jenem Augenblick an constant bliebe. Diese Beschleunigung, multiplicirt mit der Masse des Körpers, gibt dann die Grösse der Kraft in jenem Augenblick.

Wenn aber die auf den Körper wirkende Kraft nicht in der Richtung seiner ursprünglichen Bewegung wirkt, so sucht sie ihn von seinem Wege abzulenken, und da wir den Körper als gänzlich frei voraussetzen, so wird er dadurch in der That veranlasst

werden, eine krumme Linie zu beschreiben. Ein Beispiel hiezu finden wir in der Bewegung eines schweren Körpers, der in schiefer Richtung hinausgeworfen wird; man sieht denselben anfangs in krummer Linie emporsteigen und dann wieder in einer eben solchen herabsinken, alles in Folge der fortgesetzten Wirkung der Schwerkraft, welche die Richtung der Bewegung des Körpers in jedem Augenblick abändert. Man nennt eine solche Bewegung, wo der Körper der Gesammtwirkung der an ihm thätigen Kräfte frei folgen kann, eine freie. Wenn aber der Körper eine genau vorgeschriebene Bahn verfolgen muss, die im Allgemeinen nicht diejenige ist, welche ihn die auf ihn wirkenden Kräfte führen würden, wie z. B. wenn er eine schiefe Ebene hinauf oder herabläuft, so nennt man diese seine Bewegung eine gezwungene oder unfreie.

Die Bewegung des Körpers sei übrigens wie sie wolle, frei oder gezwungen, so stelle M N (Fig. 193) ein Stück seiner Bahn und A R die Richtung und Stärke der auf ihn wirkenden einzelnen Kraft oder der Mittelkraft aller auf ihn wirkenden Kräfte in dem Augenblick vor, wo er sich in A befindet. Wir denken uns diese Kraft in zwei Componenten zerlegt, von denen die eine A P in der Richtung der Bahn bei A, genauer gesagt, in der Richtung der Tangente an die Bahn bei A, die andere A Q senkrecht darauf wirkt, also in der Richtung der Normalen. Erstere heisst desshalb auch Tangentialkraft, letztere Normalkraft. Die Letztere kann offenbar auf die Geschwindigkeit des Körpers in der Bahn keinen Einfluss ausüben; dieser Einfluss müsste sich ja nach der einen Seite der Richtung der Tangente hin ebenso geltend machen als nach der andern. Die Aenderungen in der Geschwindigkeit des Körpers in seiner Bahn werden folglich allein durch die Tangentialkraft hervorgebracht und zwar genau in derselben Weise, wie wenn sich der Körper geradlinig bewegte. Es gilt daher alles, was wir oben über den Zusammenhang der Beschleunigung mit der bewegenden Kraft und in §. 125 über die Beziehungen zwischen Arbeit und lebendiger Potenz gesagt haben, auch hier. Ueberhaupt kann jede beliebige krummlinige Bewegung eines materiellen Punktes als geradlinig behandelt werden, wenn man nur immer

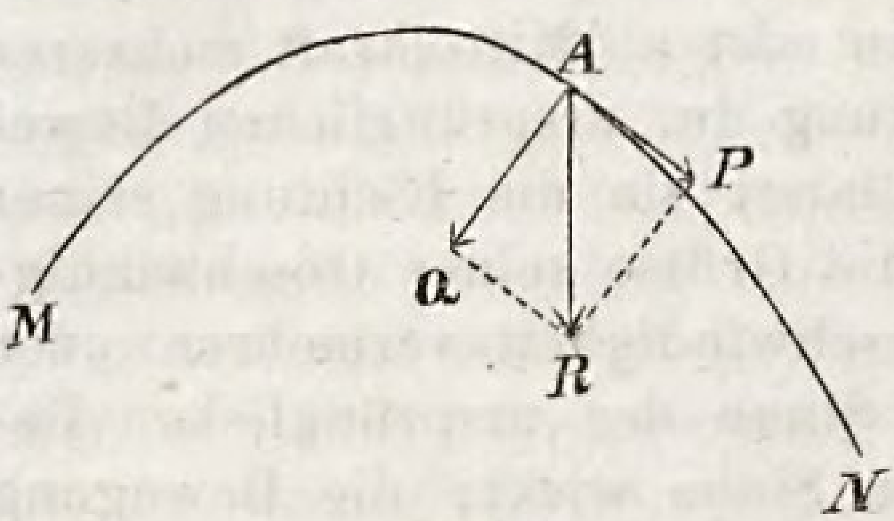


Fig. 193.

die Tangentialkraft der auf ihn wirkenden Kraft oder Mittelkraft in Betracht zieht.

In Bezug auf das Verhältniss zwischen Arbeit und lebendiger Potenz, wie wir es in §. 125 auseinandergesetzt haben, ist dies letztere übrigens gar nicht einmal nothwendig. Hier ist, wie man leicht sieht, die Arbeit der Kraft A R (Fig. 193) selbst, wenn sie nur auf die Richtung des Weges bezogen wird, genau die nämliche, wie die Arbeit der Tangentialkraft A P, die in dieser Richtung wirkt. Es lassen sich also die Ausführungen des §. 125 wörtlich hier für eine beliebige krummlinige Bewegung wiederholen.

Was die Normalkraft A Q anbelangt, so werden wir sie sogleich bestimmen lernen und zwar unter der Voraussetzung, dass sie es ist, welche die Richtungsänderung in der Bewegung des Körpers hervorbringt. Stimmt dann der lediglich aus der Form der Bahn des Körpers berechnete Werth für sie alsdann mit der wirklichen Componente A Q der Kraft A R nach den Normalen zusammen, so ist die Bewegung eine freie. Im andern Falle sind ausser der Kraft A R noch andere Einflüsse da, welche die Form der Bahn bestimmen und die Bewegung zu einer gezwungenen machen. Der Unterschied zwischen der aus der Form der Bahn berechneten und der wirklichen Normalkraft stellt dann offenbar die Einwirkung des Körpers auf die Bahn oder umgekehrt der Bahn auf den Körper vor. — So ist in dem Fall, wo ein Körper blos in Folge der Schwere eine gerade schiefe Ebene herabrollt, keine Richtungsänderung, also auch keine dazu nöthige Kraft vorhanden; die zur schiefen Ebene normale Componente G F des Gewichts G D des Körpers (Fig. 137, S. 171) ist folglich die Einwirkung des Körpers auf die Bahn selbst, hier auf die schiefe Ebene.

§. 128. **Normalkraft, Centripetalkraft, Centrifugalkraft.** — Wenn man in einer krummen Linie M A N (Fig. 194) irgend welcher Art drei sehr nahe auf einander folgende Punkte B, A, C annimmt und sich durch dieselben den Kreis, der durch sie völlig bestimmt ist, legt, so schmiegt sich dieser an die Strecke B A C der Curve so gut an, dass man das Stück B A C seines Umfangs unbedenklich für dasselbe Stück der Curve substituiren, d. h. an-

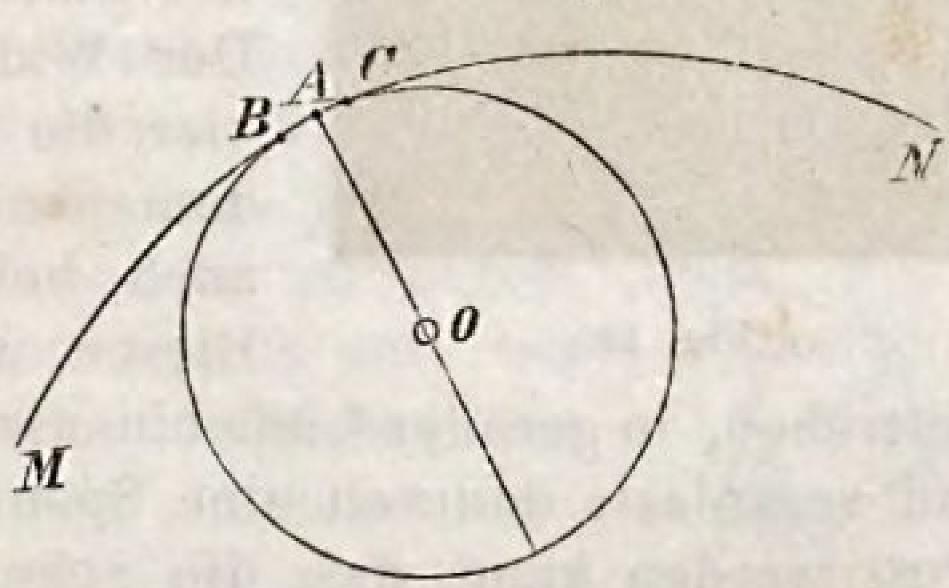


Fig. 194.

nehmen kann, dass die Richtungsänderung oder Krümmung derselben in der Strecke BAC dieselbe ist, wie die in der Strecke BAC des Kreises, oder da dieser überall gleiche Krümmung hat, wie der Kreis überhaupt. Desshalb heisst dieser Kreis der Krümmungskreis für die Stelle A der Curve. Nun hängt die Grösse der Normalkraft, welche nothwendig ist, um die Richtungsänderung eines Körpers, der sich in der Curve bewegt, hervorzubringen, und deren Richtung offenbar die von A nach dem Mittelpunkt O des Krümmungskreises gehende ist, natürlich mit von der grösseren oder geringeren Krümmung der Curve an der betreffenden Stelle ab und ist daher dieselbe, ob sich der Körper auf der Strecke BAC in der Curve selbst oder auf dem Krümmungskreis bewegt. Umgekehrt: die Normalkraft, welche nothwendig ist, um den Körper in dem Krümmungskreis herumzuführen, ist die nämliche als diejenige an der Stelle A der Curve, für welche jener Krümmungskreis construirt ist.

Wir haben somit die Aufgabe, die Normalkraft an irgend einer Stelle der krummen Bahn eines Körpers zu finden, auf die zurückgeführt, diese Kraft in einem Kreise von bestimmtem Halbmesser zu bestimmen, und sie dadurch offenbar wesentlich vereinfacht. Ueberdies kommen solche Bewegungen im Kreise schon an sich in der Praxis sehr häufig vor. Wenn man einen Körper, der an das eine Ende einer Schnur befestigt ist, deren anderes Ende in der Hand gehalten wird, im Kreise herumschwingt, so hat man eine solche Kreisbewegung auf die einfachste Art hergestellt. Der Körper sucht in jedem Augenblick in gerader Richtung, in der Richtung der Tangente AC (Fig. 195) an den Kreis in dem Punkt A, wo er sich gerade befindet, hinauszugehen, wird aber durch den Widerstand des Fadens daran verhindert und genöthigt eine Kreislinie um den Punkt B zu beschreiben, wo der Faden in der Hand gehalten wird. Der Widerstand des Fadens bildet also hier die Normalkraft, oder wie sie in dem speciellen Falle einer Kreisbewegung auch heisst, die Centripetalkraft. Dieser wirkt der Körper durch sein Bestreben, in gerader Linie hinauszugehen, fortwährend entgegen, und veranlasst dadurch eine Spannung der Schnur, die selbst so gross werden kann, dass die Schnur zerreisst. Es ist klar, dass diese Gegenwirkung des Körpers genau so gross als die Centri-

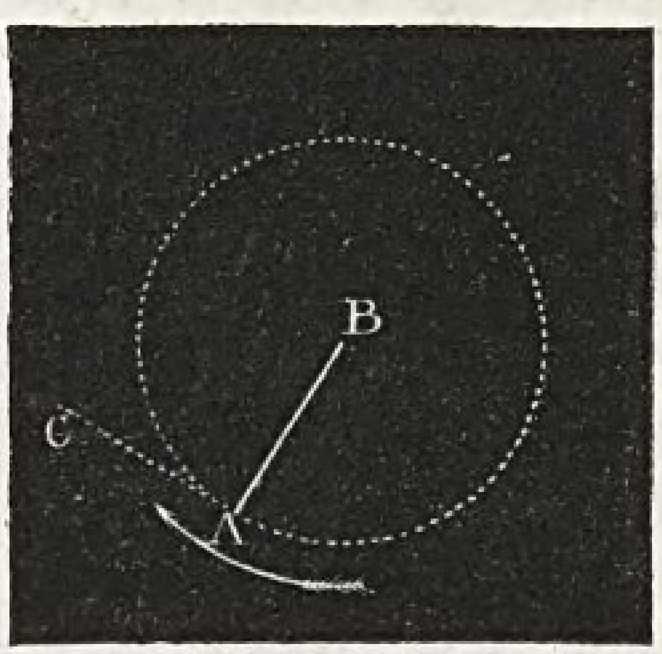


Fig. 195.

petalkraft sein muss; da sie aber in ganz ähnlicher Weise wie eine Kraft wirkt, die den Körper mehr und mehr vom Centrum seiner Bewegung zu entfernen sucht, so wird sie Centrifugalkraft oder Fliehkraft genannt.

Die Centrifugalkraft wird, wie wir gesehen haben, durch die Nöthigung hervorgerufen, durch welche der Körper veranlasst wird, den Umfang eines Kreises zu beschreiben; sobald diese Nöthigung aufhört, verschwindet auch die Centrifugalkraft. Wenn man z. B. während der Bewegung die Schnur durchschneidet, so wird sich der Körper nach der Tangente AC (Fig. 195) weiter bewegen, welche durch den Punkt des Kreises gezogen wird, wo er sich eben befand, als man ihn frei machte. Diese seine Bewegung ist die Fortsetzung derjenigen, welche er in dem Augenblick besass, als man die Schnur durchschnitt, nur wird sie jetzt auf keine Weise mehr durch die Centripetalkraft verändert, welche in demselben Augenblick zu wirken aufhörte; mit ihr verschwindet natürlich auch die Centrifugalkraft. Die Centrifugalkraft veranlasst also die Spannung der Schnur und kann dieselbe sogar zerreissen, aber sie wirkt nicht mehr, sobald der Körper nicht mehr genöthigt wird, einen Kreis zu beschreiben.

Die Schleuder, welche dazu dient, Steine oder andere Körper mit sehr bedeutender Geschwindigkeit hinauszuwerfen, besteht bekanntlich aus einem Stück Zeug oder Leder, an welches zwei Schnüre befestigt sind (Fig. 196). Man legt, wie es die Figur zeigt, einen Stein darauf, ergreift die Enden der beiden Schnüre und gibt der Schleuder eine schnelle Drehbewegung um die Hand. Während dieser Bewegung werden die Schnüre durch die Centrifugalkraft angespannt, und wenn man in einem passenden Augenblick eine derselben loslässt, so beschreibt der dadurch freigewordene Stein nicht mehr den Umfang eines Kreises, sondern geht vielmehr in der Richtung der Tangente an diesen Kreis hinaus, und zwar von dem Punkt aus, wo er sich befand, als die Schleuder aufhörte, ihn festzuhalten. Die Aufgabe desjenigen, welcher sich dieses Instrumentes bedient, besteht darin, den Stein in dem richtigen Punkt A (Fig. 197) loszulassen,

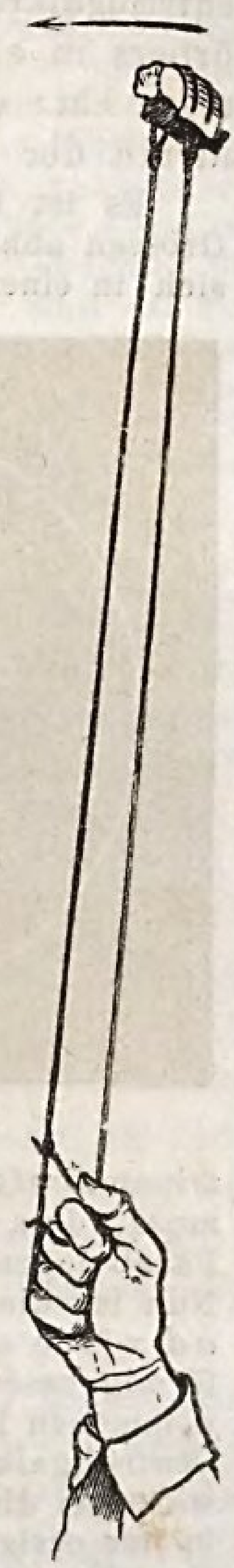


Fig. 196.

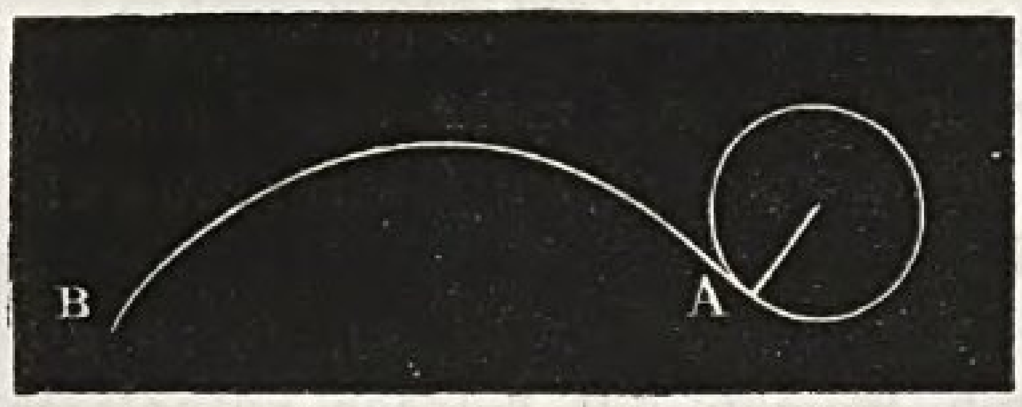


Fig. 197.

damit er, nachdem er von diesem Punkt in der Richtung der Tangente an den Kreis ausgegangen ist, und alsdann unter der Wirkung der Schwerkraft eine Parabel (s. den späteren §. 139) beschrieben hat, in dem Punkt B ankommt, welchen man treffen will.

§. 129. Man sieht durch den einfachsten Versuch, dass die Centrifugalkraft, welche bei der gleichförmigen Bewegung eines Körpers in einem Kreise entwickelt wird, nicht immer dieselbe Grösse hat: sie ändert sich mit der Geschwindigkeit des Körpers und mit der Grösse des Kreises, welchen er beschreibt.

Es ist leicht zu bestimmen, in welcher Weise sie von diesen Grössen abhängt. Denken wir uns, ein Körper a (Fig. 198) bewege sich in einem Kreis von gewisser Grösse mit solcher Geschwindigkeit, dass der Bogen ac, den er in einer Secunde beschreibt, klein genug ist, um als gerade Linie betrachtet werden zu können. Die Geschwindigkeit des Körpers in dem Punkt a sei durch die gerade Linie ab eines Stücks der Tangente an den Kreis im Punkte a vorgestellt, d. h. ab sei der Weg, welchen der Körper ohne die Wirkung der Centripetalkraft in einer Secunde in gerader Linie zurücklegen würde. Dann ist klar, dass der Weg, welchen der Körper in derselben Secunde zurück legen würde, wenn er der Wirkung der Centripetalkraft allein frei überlassen wäre, eine solche Grösse ad haben muss, dass das über den beiden Linien ab und ad beschriebene Parallelogramm den Punkt c zum vierten Eckpunkt hat (vgl. §. 17). Nun ist die Centrifugalkraft eine stetig wirkende Kraft; der Weg ad würde also mit beschleunigter Bewegung und zwar mit gleichförmig beschleunigter Bewegung zurückgelegt werden, da im angenommenen Fall ad so klein sein wird, dass man die Aenderung der Centrifugalkraft zwischen a und d vernachlässigen darf. Zugleich wäre bei dieser gleichförmig beschleunigten Bewegung ad der Weg in der ersten Secunde, und folglich die Beschleunigung, welche die Centrifugalkraft dem Körper ertheilen würde, wenn sie allein auf

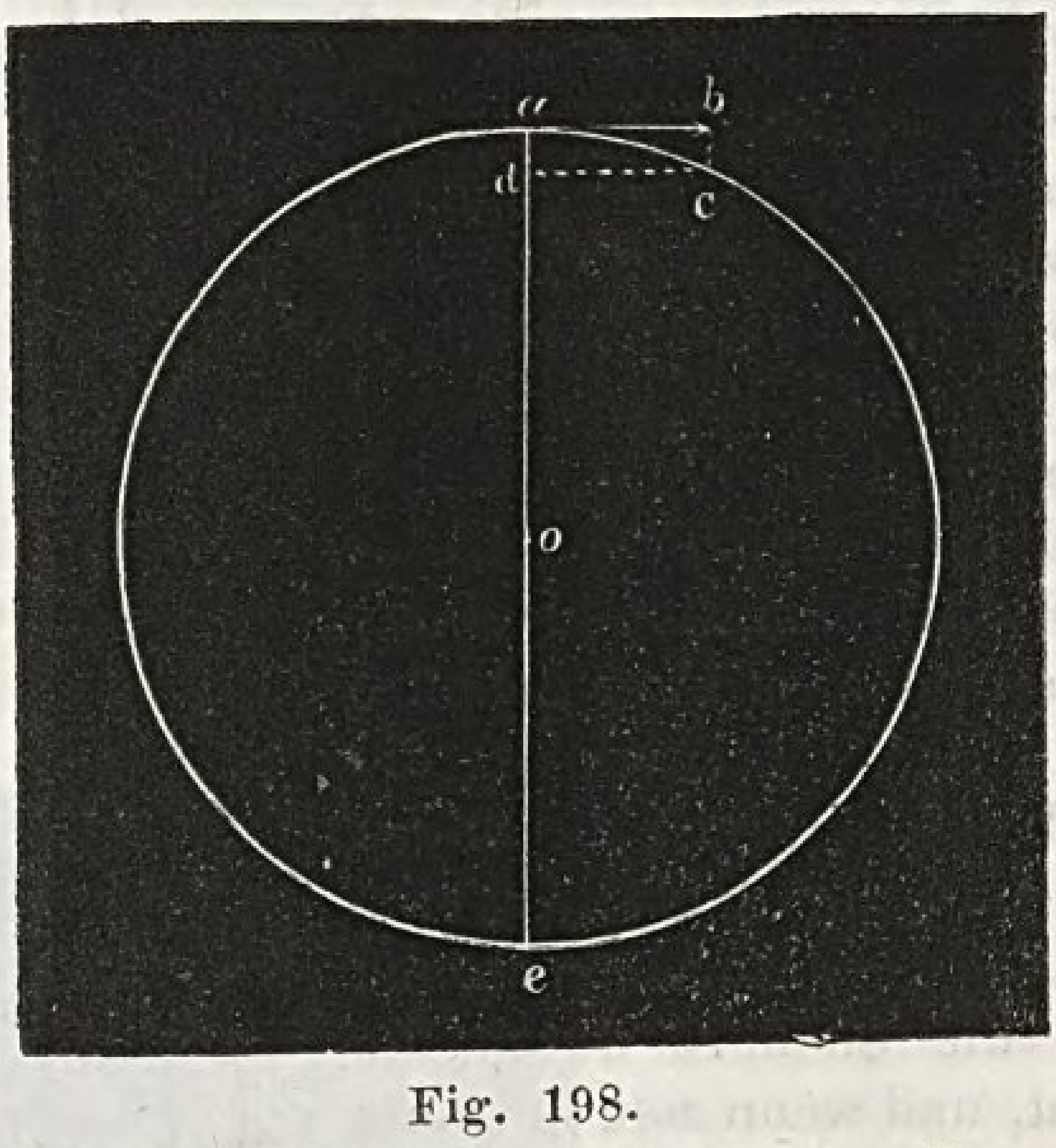


Fig. 198.

ihn einwirkte, doppelt so gross als ad. Nun findet nach einem bekannten geometrischen Satz die Proportion statt:

$$ad : ac = ac : ae$$

oder auch: $2ad : ac = ac : ao$.

Bezeichnet man daher die Beschleunigung, welche die Centripetalkraft dem Körper, wenn sie allein auf ihn einwirkt, ertheilen würde, also $2ad$, mit b; ferner mit v die Geschwindigkeit ac des Körpers in der Secunde bei seiner Bewegung auf dem Umfang des Kreises und mit r den Radius ao dieses Kreises, so hat man die Proportion

$$b : v = v : r, \text{ woraus } b = \frac{v^2}{r}.$$

Wenn der Halbmesser des Kreises so klein oder die Geschwindigkeit des Körpers so gross wird, dass der in einer ganzen Secunde beschriebene Bogen ac nicht mehr als gerade Linie angesehen werden kann, so nimmt man anstatt einer Secunde eine halbe oder eine zehntel Secunde etc. Dann wird der Weg ab, der in dieser Zeit von dem Körper beschrieben worden wäre, wenn die Centripetalkraft nicht wirken würde, halb oder zehnmal so klein, während der Weg ad, welchen der Körper in derselben Zeit in Folge der Centripetalkraft allein mit gleichförmig beschleunigter Bewegung beschreiben würde, vier oder hundertmal so klein wird. Man hat also in obiger Proportion statt $2ad$ den vierten oder hundertsten Theil der Beschleunigung b und statt ac die Hälfte oder den zehnten Theil der Geschwindigkeit v zu setzen. Dadurch wird aber die Proportion gar nicht geändert und liefert für b noch denselben Werth $\frac{v^2}{r}$ wie oben.

Nun ist die Kraft, welche einem Körper eine gewisse Beschleunigung ertheilt, gleich der Masse des Körpers multiplicirt mit dieser Beschleunigung. Bezeichnet daher m die Masse eines Körpers, der sich mit der Geschwindigkeit v in einem Kreise mit dem Halbmesser r bewegt, so ist die hiezu nöthige Centripetalkraft und folglich auch die Centrifugalkraft, welche entwickelt wird,

$$C = \frac{mv^2}{r}.$$

Daraus folgt:

1) Unter sonst gleichen Umständen ist die Centripetal- oder Centrifugalkraft der Masse des Körpers, welcher sich im Kreise bewegt, proportional.

2) In gleich grossen Kreisbahnen verhalten sich die Centripetal- oder Centrifugalkräfte wie die Quadrate der Geschwindigkeiten der bewegten Körper: sie werden 4, 9 16mal so gross, wenn die Geschwindigkeiten 2, 3, 4mal so gross werden.

3) In Kreisbahnen von verschiedenen Halbmessern verhalten sich die Centripetal- oder Centrifugalkräfte bei gleichen Geschwindigkeiten der bewegten Körper umgekehrt wie die Halbmesser:

sie sind 2, 3, 4mal so gross in Kreisbahnen, deren Halbmesser 2, 3, 4mal so klein sind.

Um bei einer beliebigen krummlinigen Bewegung eines Körpers die Normalkraft für irgend eine Stelle seiner Bahn zu finden, darf man nur überall in obigen Sätzen statt Radius des Kreises überhaupt Radius des Krümmungskreises für jene Stelle und anstatt Centripetal- oder Centrifugalkraft Normalkraft setzen.

§. 130. Die folgenden Apparate sollen dazu dienen, das, was bisher über die Centrifugalkraft gesagt wurde, durch Versuche näher zu erläutern. Es wird sich dabei immer um die Bewegung eines Körpers um einen Mittelpunkt oder um eine Achse handeln, aber es ist doch leicht, das bisher Gesagte schon jetzt darauf anzuwenden, wenn man sich die Masse des Körpers in einem Punkt, am besten in seinem Mittelpunkt oder Schwerpunkt, vereinigt denkt. — Wir nehmen zuerst die für Versuche über die Centrifugalkraft gewöhnlich gebrauchte sog. Centrifugalmaschine.

Die Fig. 199 zeigt einen Apparat ABC, der von einem Fuss von Holz getragen wird und sich auf diesem Fuss horizontal umdrehen kann. Indem man an einer Schnur, welche mehrmals um den cylindrischen Theil A herumgeschlungen ist, rasch anzieht, kann man dem Apparat eine sehr schnelle Rotationsbewegung geben. Zwischen den Punkten B und C befindet sich ein Metalldraht gut ausgespannt, längs dessen sich

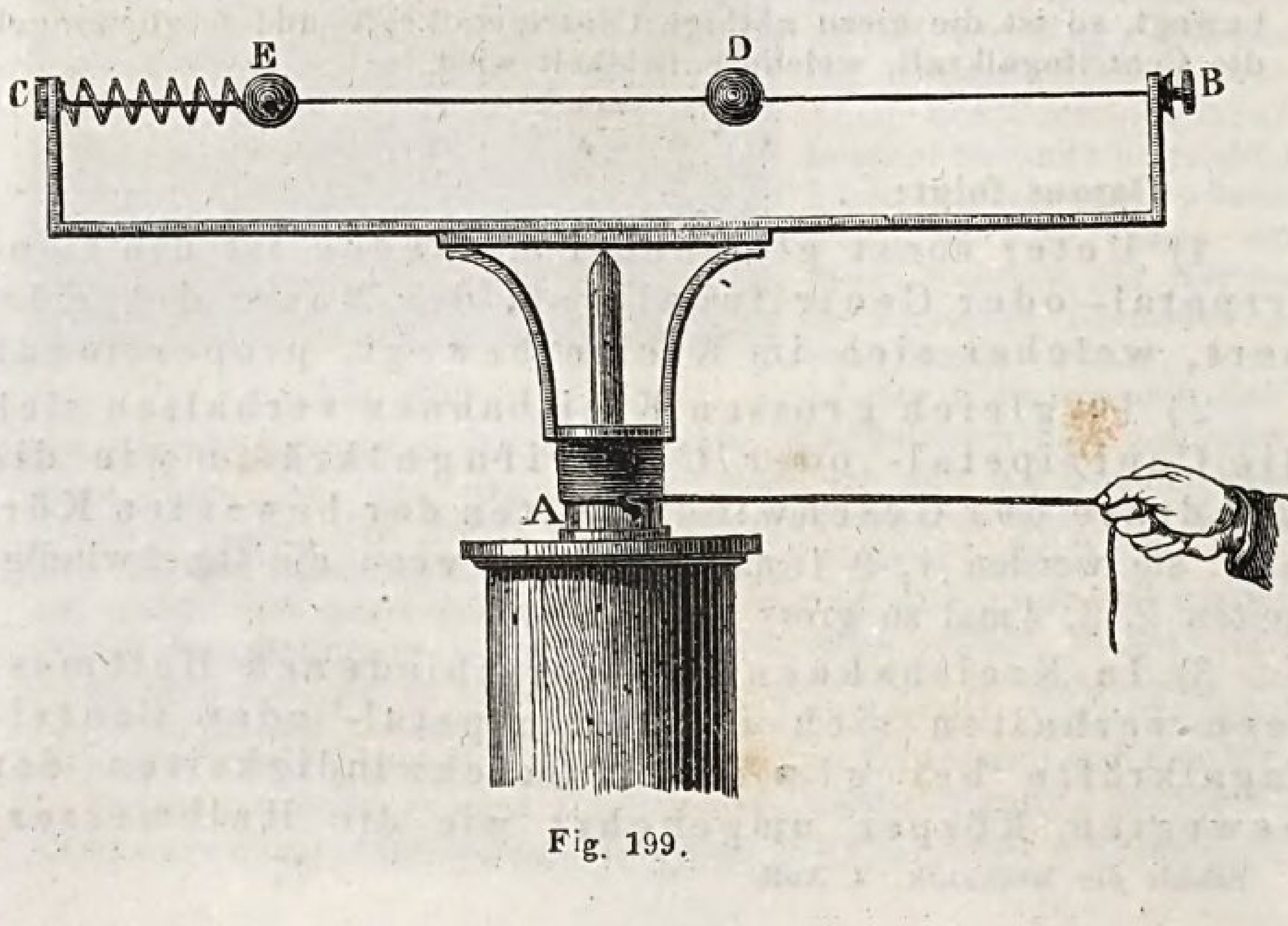


Fig. 199.

zwei Kugeln D und E von Elfenbein, durch welche der Draht hindurchgeht, bewegen können. Wenn die Kugel D so steht, wie es die Figur anzeigt, und man setzt den Apparat in rasche Rotation, so sieht man, wie sich dieselbe vom Mittelpunkt der Bewegung entfernt und an das äusserste Ende (B) des Drahtes hinausrückt. Ebenso sucht auch die Kugel E, welche sich unter ähnlichen Umständen befindet, nach dem Punkt C hinauszurücken, wird aber daran durch eine schraubenförmig gewundene Feder verhindert, welche rings um den Draht angebracht ist. Nichtsdestoweniger entfernt sich die Kugel E vom Centrum ihrer Bewegung; sie drückt die Feder zusammen und die Spannung, welche sie derselben mittheilt, kann dazu dienen, die Grösse der durch die Rotationsbewegung entwickelten Centrifugalkraft zu messen und die oben entwickelten Gesetze zu bestätigen.

Die Fig. 200 zeigt einen andern Apparat, der sich auf dem nämlichen Fuss befindet und auf dieselbe Art in Drehung um eine vertikale Achse versetzt wird. Von zwei geneigten Glas-

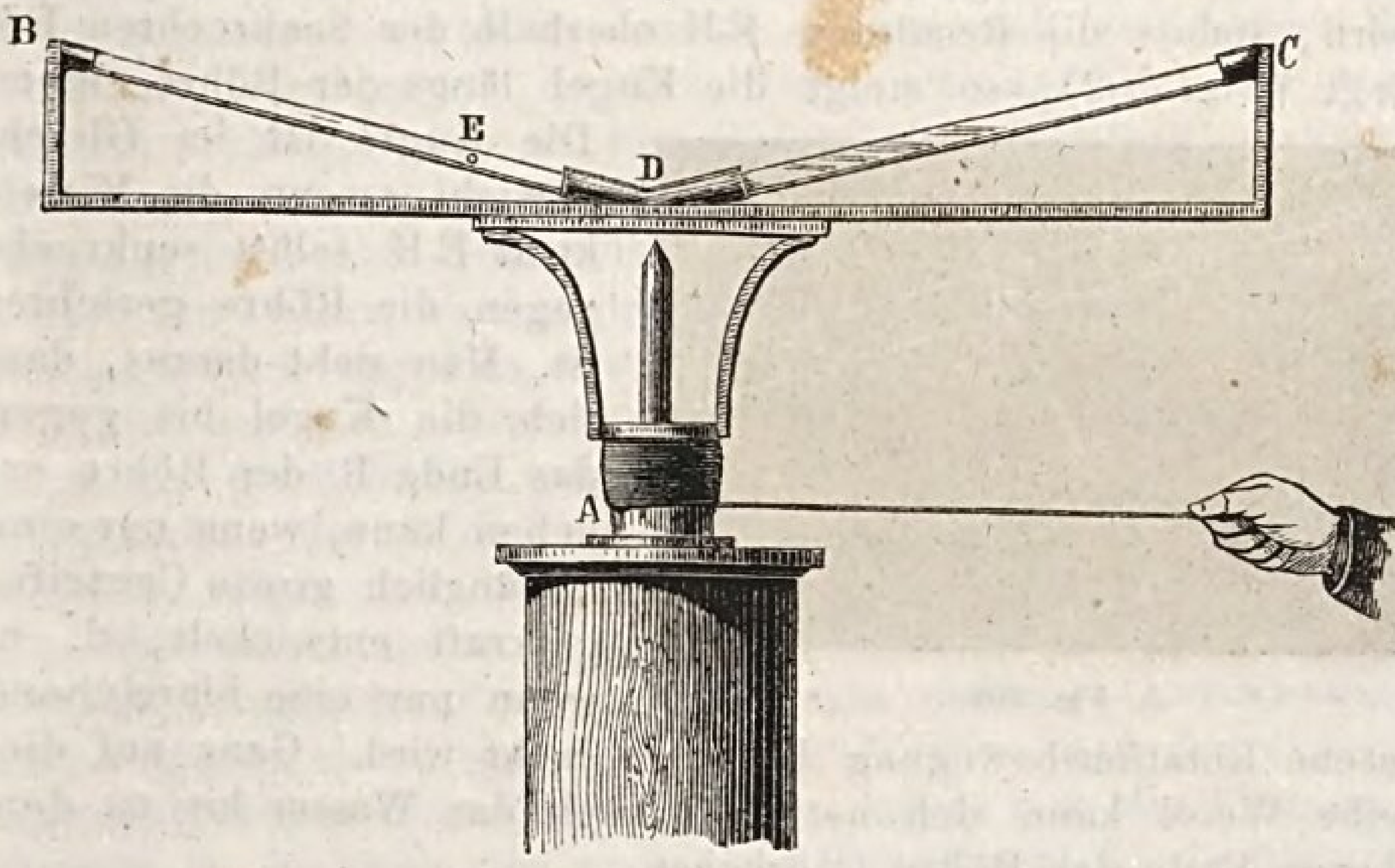


Fig. 200

röhren DB und DC enthält die eine eine Kugel E, die andere eine gewisse Quantität Wasser. Wenn man diese beiden Röhren rasch umdreht, so sieht man die Kugel und das Wasser gegen die oberen Enden B und C ihrer Röhren emporsteigen. Um uns über die Art und Weise Rechenschaft zu geben, auf welche diese aufsteigende Bewegung hervorgebracht wird, wollen wir untersuchen, was vor sich geht, wenn sich die Kugel während der Rotationsbewegung des Apparats in irgend einem Punkt

ihrer Röhre befindet. Offenbar wirken zwei Kräfte auf die Kugel; einmal ihr Gewicht, welches durch eine vertikal abwärts gehende Kraft EF (Fig. 201) dargestellt werden kann, und zweitens die Centrifugalkraft EG, welche sie von der Rotationsachse in senkrechter Richtung auf dieselbe zu entfernen sucht und also horizontal gerichtet ist. Die beiden Kräfte können durch eine einzige Kraft EH, ihre Mittelkraft, ersetzt werden. Wenn die Richtung dieser Kraft unterhalb der Senkrechten EK auf die Röhre liegt, wie es in Fig. 201 der Fall ist, so ist klar, dass die Kugel herabrollen muss oder doch, wenn sie noch unten ist, nicht aufwärts steigt. Wenn aber die Centrifugalkraft grösser wird, sodass die Resultante EH oberhalb der Senkrechten EK liegt (Fig. 202), so steigt die Kugel längs der Röhre empor.

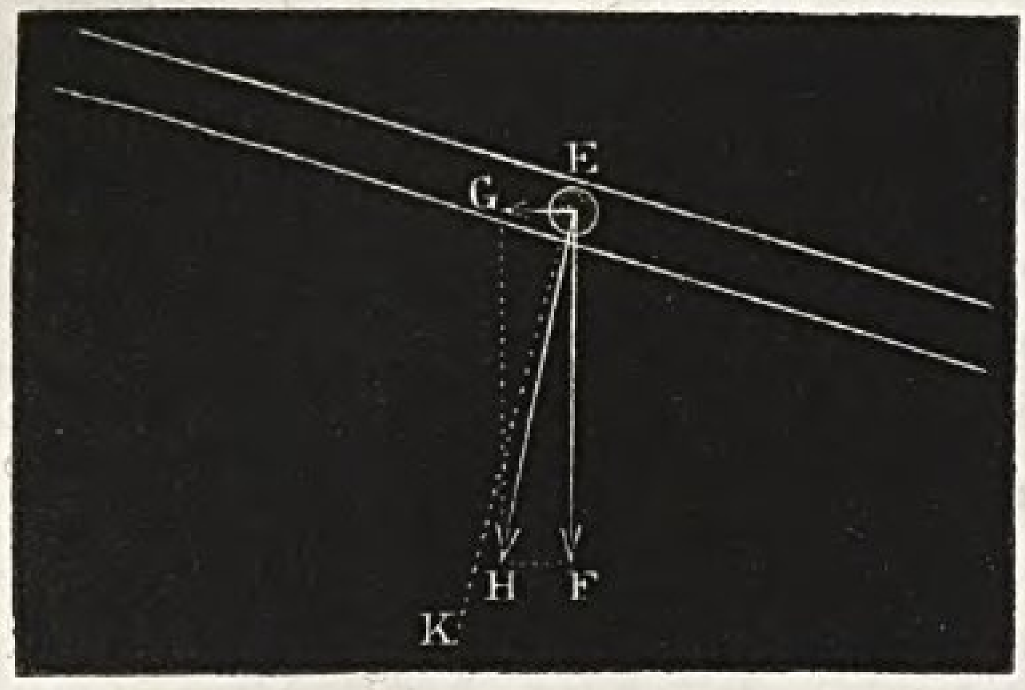


Fig. 201.

Die Kugel ist im Gleichgewicht, wenn die Mittelkraft EH selbst senkrecht gegen die Röhre gerichtet ist. Man sieht daraus, dass sich die Kugel bis gegen das Ende B der Röhre erheben kann, wenn nur eine hinlänglich grosse Centrifugalkraft entwickelt, d. h. wenn nur eine hinreichend rasche Rotationsbewegung hervorgebracht wird. Ganz auf dieselbe Weise kann sich natürlich auch das Wasser bis zu dem oberen Ende der Röhre C erheben.

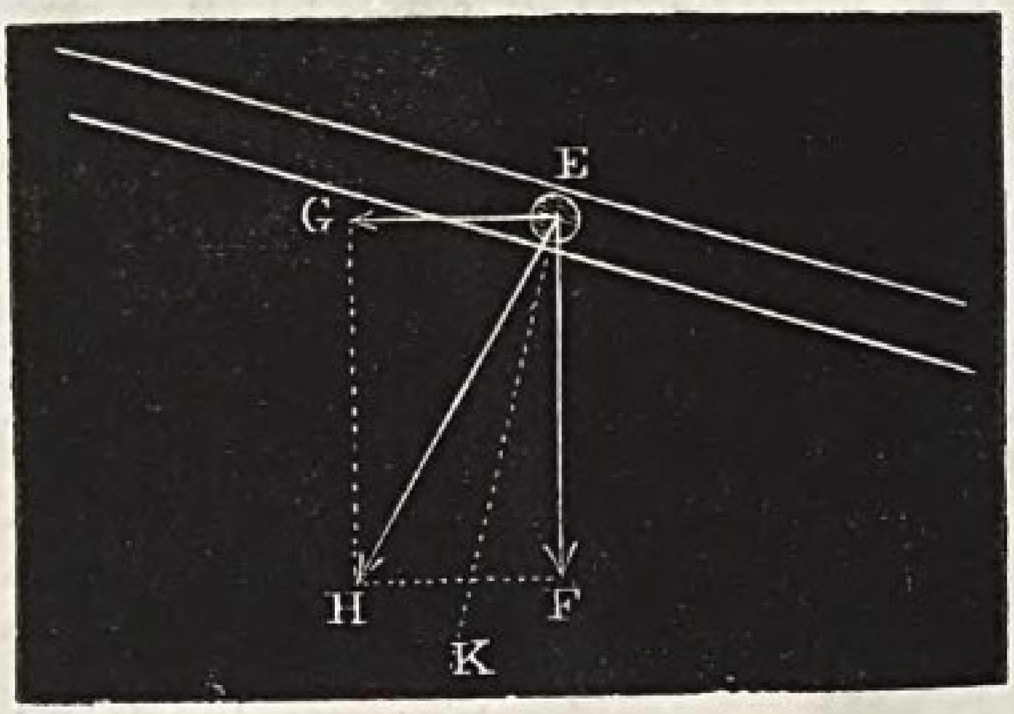


Fig. 202.

Die Fig. 203 zeigt die Anordnung eines dritten Apparats, mittelst dessen man ebenfalls die Entwicklung der Centrifugalkraft durch die Rotationsbewegung nachweisen kann. Zwei Lamellen von sehr biegsamen Stahlfedern sind kreisförmig gebogen und ihre Enden an einander befestigt, sodass sie zwei vollständige Kreise bilden, deren Ebenen auf einander senkrecht stehen. Ein Stab von Eisen ist in der Richtung des gemeinschaftlichen vertikalen Durchmessers der beiden Kreise an den untern Theilen derselben festgemacht, während er oben dieselben frei durch-

dringt, indem er durch Löcher hindurchgeht, welche in den Federn angebracht sind. Diese Anordnung erlaubt, die Gestalt der Kreise abzuändern, indem man sie an ihrem obersten Theil mit der Hand ergreift und denselben hebt oder senkt. Der Stab kann mittelst einer Kurbel und einer

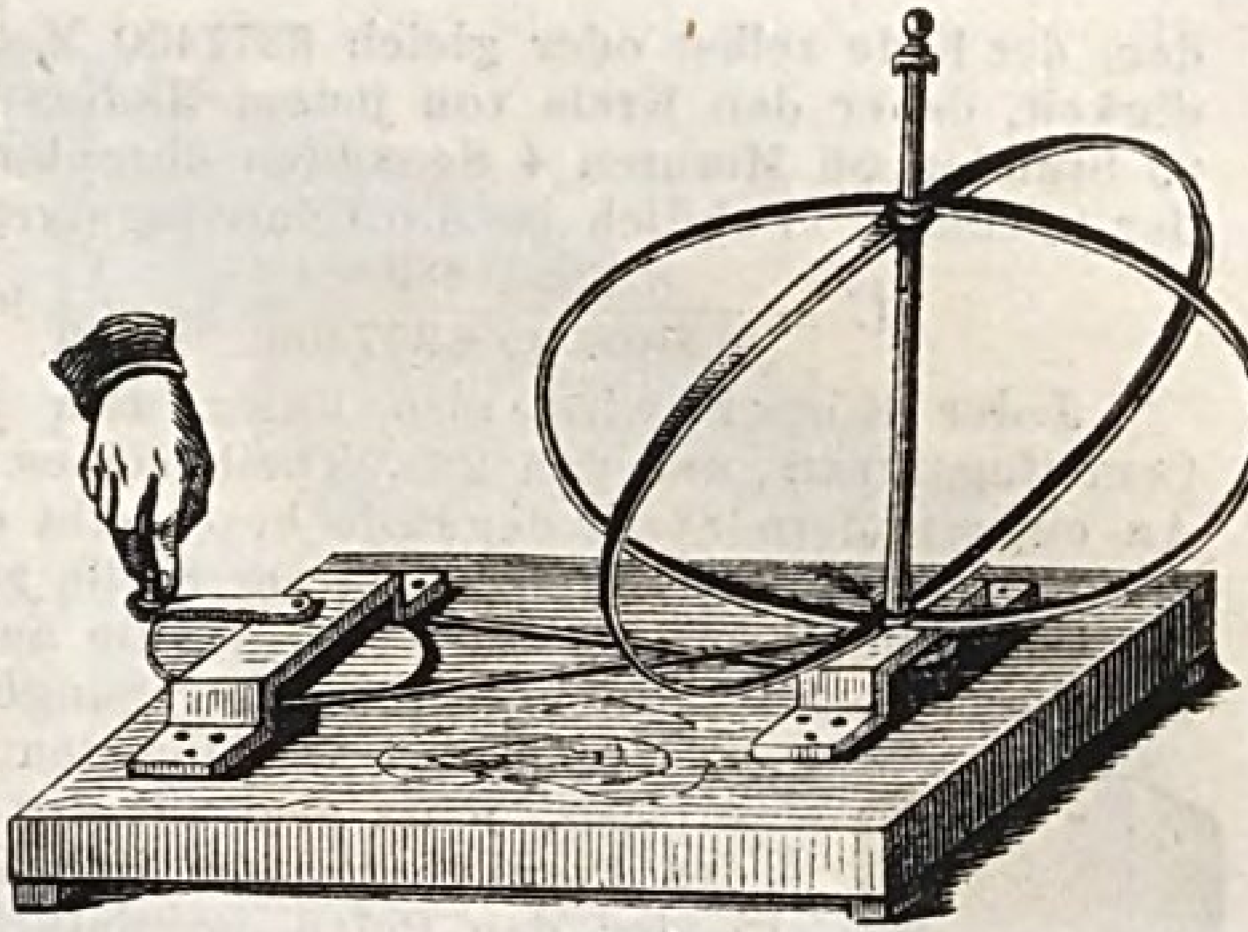


Fig. 203.

Schnur ohne Ende eine schnelle Rotationsbewegung um sich selbst erhalten und theilt diese Bewegung den an seinem untern Ende festgemachten Federn mit. Sobald diese sich aber herumdrehen, sieht man sie ihre Gestalt verändern: der vertikale Durchmesser verkürzt sich, während sich der horizontale verlängert, wie es Fig. 203 zeigt, und diese Gestaltsveränderung wird um so merkbarer, je schneller die Rotationsbewegung wird. Der Grund davon ist leicht einzusehen. Alle Moleküle der Federn werden durch die Rotationsbewegung von Centrifugalkräften ergriffen, die sie in horizontaler Richtung von der Rotationsachse zu entfernen suchen und um so grösser werden, je weiter die Moleküle von der Rotationsachse entfernt sind. Die Biegsamkeit der Federn gestattet ihnen, diesen Kräften zum Theil zu folgen und so die beschriebene Gestalt anzunehmen.

Man macht diesen Versuch gewöhnlich, um zu zeigen, dass die Abplattung der Erde an den Polen und ihre Anschwellung am Aequator eine Folge ihrer Achsendrehung und der dadurch hervorgerufenen Centrifugalkraft ist, indem man die biegsamen Federn an die Stelle der noch als weich oder im feurig flüssigen Zustand gedachten Erdmasse setzt. Da wir später auf dieses Thema ausführlicher zu sprechen kommen, so soll jetzt nicht näher darauf eingegangen werden.

Eine andere Wirkung der durch die Achsendrehung der Erde hervorgerufenen Centrifugalkraft ist die Verminderung des Gewichtes, welche die an ihrer Oberfläche befindlichen Körper dadurch erfahren. Nach dem, was wir oben über die Grösse der Centrifugalkraft gesagt haben, lässt sich diese Verminderung unschwer berechnen. Denken wir uns einen 1^k schweren Körper unter dem Aequator, so ist seine Masse $\frac{1}{g} = \frac{1}{9{,}8088}$. Der Halbmesser r seiner Bahn ist gleich

dem der Erde selbst oder gleich 6377400 Meter und seine Geschwindigkeit, da er den Kreis von jenem Radius in einem Sterntag oder 23 Stunden 56 Minuten 4 Secunden durchläuft, gleich 465 Meter in der Secunde. Folglich ist die Centrifugalkraft

$$C = \frac{1 \times 465^2}{9{,}8088 \times 6377400} = \frac{1}{289} \text{ Kilogramm.}$$

Jeder Körper wird also unter dem Aequator in Folge der Centrifugalkraft um den 289. Theil seines Gewichtes leichter. — An einer andern Stelle der Erde beschreibt der Körper einen Kreis, der mit dem Parallelkreis an dieser Stelle zusammenfällt. Auch ist die Centrifugalkraft der Schwerkraft, die nach dem Mittelpunkt der Erde gerichtet ist, nicht direct entgegengesetzt, sondern hat die Richtung des verlängerten Radius jenes Parallelkreises, muss also mit der Schwerkraft vermittelst des Parallelogramms der Kräfte vereinigt werden. Unter den Polen ist natürlich dieser Einfluss der Centrifugalkraft, wie sie selbst, Null.

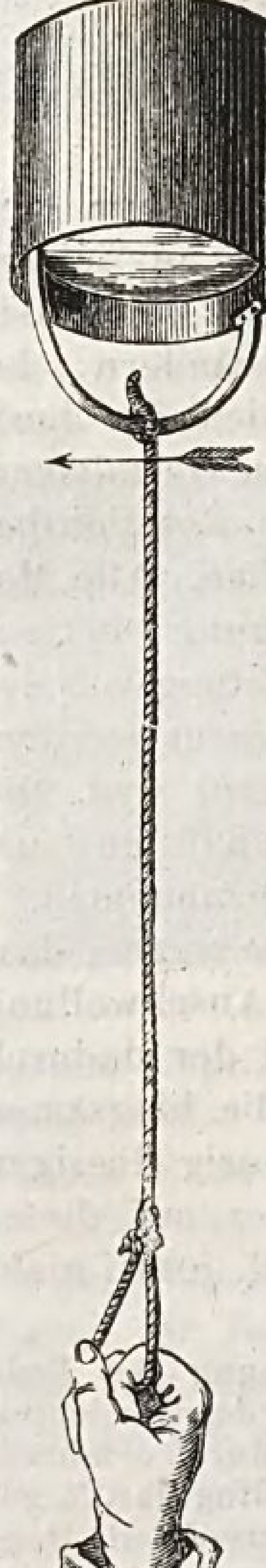


Fig. 204.

Wenn man ein mit Wasser gefülltes Gefäss an dem einen Ende einer Schnur befestigt, von welcher man das andere Ende in der Hand hält, und man schwingt es wie eine Schleuder herum, so bleibt das Gefäss gefüllt, obgleich es, wenn es sich in dem oberen Theil des Kreises befindet, welchen es beschreibt, vollständig umgekehrt ist (Fig. 204). Dies rührt, wie man leicht sieht, daher, dass das Wasser während seiner Bewegung nicht nur unter der Wirkung seiner Schwere allein, sondern auch unter der der Centrifugalkraft steht. Wenn sich das Gefäss in dem obersten Theil des Kreises befindet, welchen es beschreibt, so sucht das Wasser in Folge seines Gewichtes herabzufallen; aber die Centrifugalkraft, welche von unten nach oben gerichtet ist, sucht es im Gegentheil emporzuheben; wenn also nur diese letztere Kraft nicht kleiner als jene erstere ist, so verhindert sie das Wasser am Herabfallen.

§. **131.** Die Centrifugalkraft gibt uns die Erklärung von manchen Thatsachen und Erscheinungen, welche man beobachten kann.

Wenn ein Kunstreiter aufrecht auf einem Pferde steht, das mit grosser Schnelligkeit den Umfang des Circus durchläuft, so stellt er sich nicht vertikal auf das Pferd; sein Körper ist gegen die Mitte der Rennbahn geneigt, und zwar um so mehr, je schneller das Pferd läuft (Fig. 205).

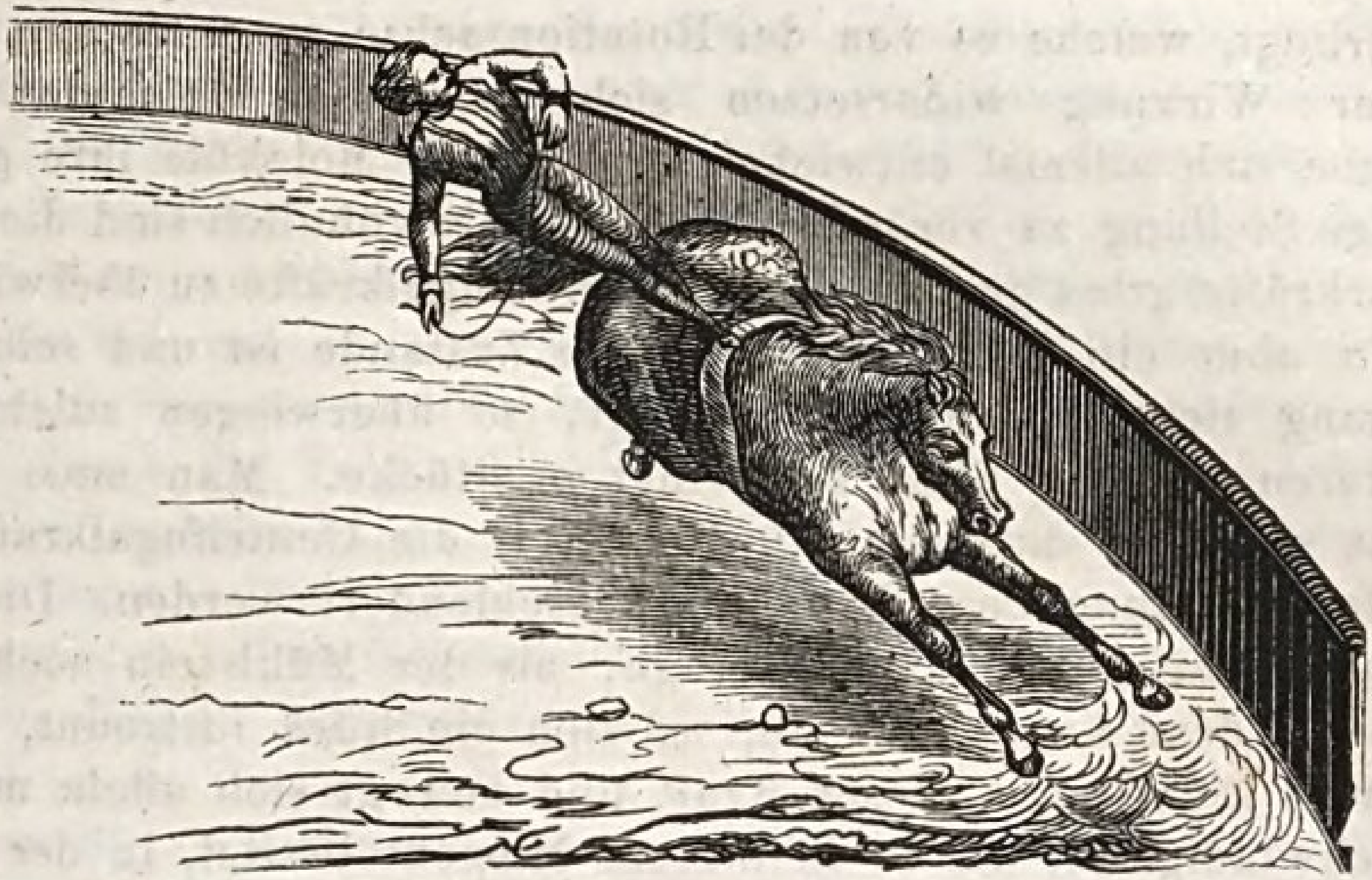


Fig. 205.

Es ist die Centrifugalkraft, welche ihn nöthigt, diese Stellung anzunehmen; er müsste nothwendig herabfallen, wenn er sich in derselben Weise auf das Pferd stellen wollte, wie er es thun muss, wenn dasselbe still steht. Die Centrifugalkräfte, welche sich in den verschiedenen Theilen des Körpers des Kunstreiters entwickeln, setzen sich in eine einzige Kraft zusammen, welche horizontal gerichtet ist und ihn von der Mitte der Rennbahn zu entfernen sucht. Diese Kraft vereinigt sich ihrerseits wieder mit dem Gewicht seines Körpers, und damit er unter der Wirkung der daraus hervorgehenden schiefen Mittelkraft nicht herabfällt, muss er dieselbe Neigung annehmen wie diese, so dass dieselbe das Innere des Polygons trifft, welches seine Unterstützungspunkte auf dem Pferde bilden.

Manchmal sieht man einen Kunstreiter auf einem Pferde, welches mit grosser Geschwindigkeit die Rennbahn durchläuft; ganz seitwärts nur auf der Flanke des Pferdes sitzen. Er würde unfehlbar herabfallen, wenn er nur unter der Wirkung der Schwere stünde; aber die Centrifugalkraft hält ihn im Gleichgewicht, wie im vorhergehenden Fall.

In Werkstätten, wo Mühl- oder Schleifsteine von Sandstein in sehr schnelle Umdrehung versetzt werden, kommt es manchmal vor, dass ein Stein in Stücke zerbricht und dass die Stücke davon nach allen Seiten hin mit grosser Geschwindigkeit hinausgeschleudert werden, wodurch sehr schwere Unfälle entstehen können. Um sich von dieser Wirkung Rechenschaft zu geben, darf man nur beachten, dass während der Bewegung des Steins jedes Molekül desselben der Wirkung einer Centrifugalkraft

unterliegt, welche es von der Rotationsachse zu entfernen sucht; dieser Wirkung widersetzen sich aber die Molekularkräfte, welche sich allemal entwickeln, sobald die Moleküle ihre gegenseitige Stellung zu verändern suchen. Gewöhnlich sind die Molekularkräfte gross genug, um die Centrifugalkräfte zu überwinden; wenn aber ein Stein in schlechtem Zustande ist und seine Bewegung sich zu sehr beschleunigt, so überwiegen zuletzt die letzteren und der Stein zerspringt in Stücke. Man muss indess nicht glauben, dass die Stücke durch die Centrifugalkraft und in der Richtung derselben hinausgeschleudert werden. Die Centrifugalkraft existirt nur so lange, als der Mühlstein noch ganz ist; von dem Augenblick an, wo sich ein Stück lostrennt, unterliegt es nicht mehr dieser Kraft und bewegt sich allein mit der Geschwindigkeit, die es in diesem Moment besitzt, in der Richtung der Tangente an den Kreis, den es beschrieben hat.

§. **132.** Man bedient sich der Centrifugalkraft in verschiedenen Fällen, um nützliche Wirkungen hervorzubringen. Wir werden in der Folge mehrere Beispiele davon erhalten; für den Augenblick begnügen wir uns, das folgende anzugeben.

Seit einiger Zeit benützt man bei den sogenannten Centrifugaltrockenmaschinen die Centrifugalkraft, um die Wäsche schnell zu trocknen. Die Fig. 206 zeigt eine Maschine dieser

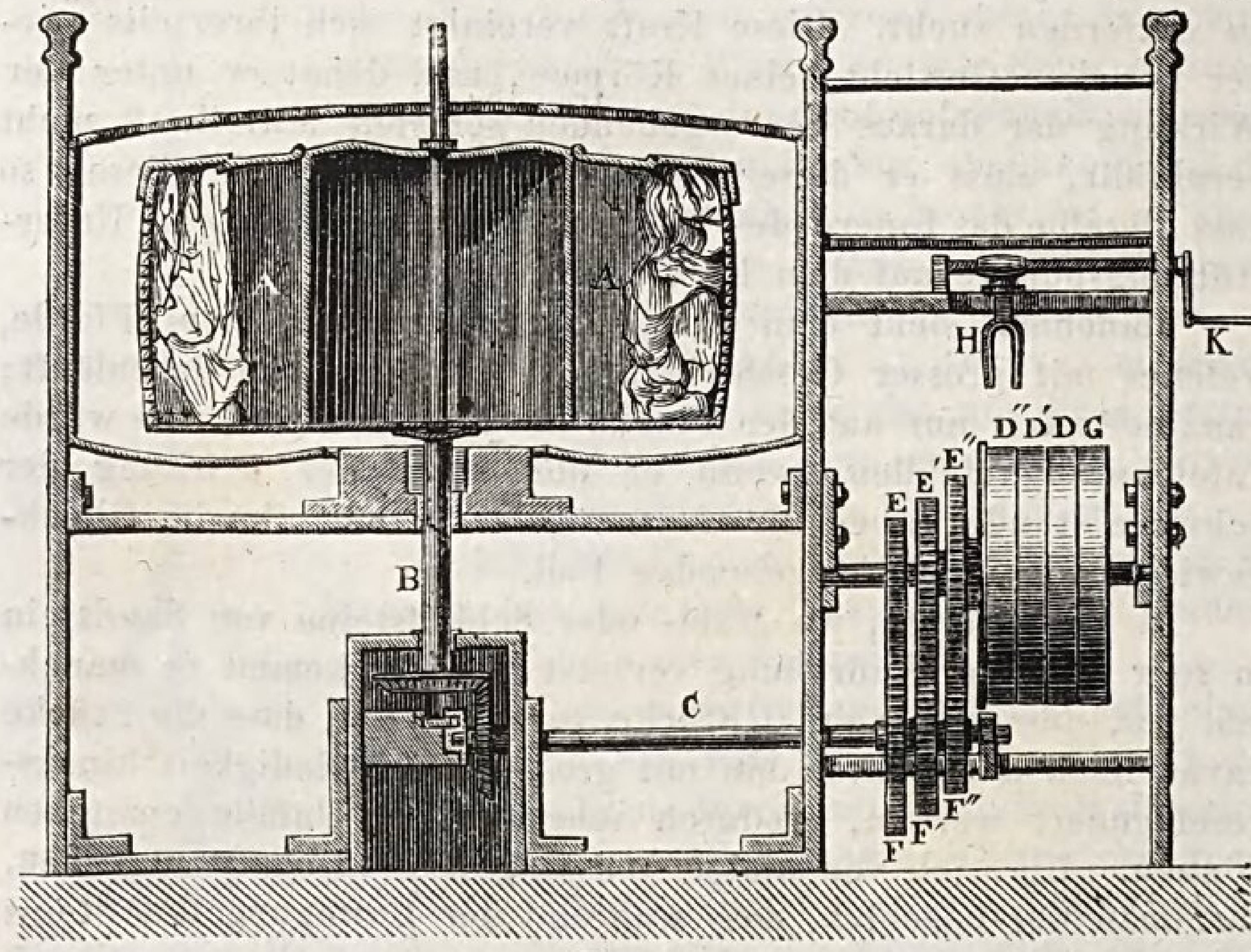


Fig. 206.

Art, wie sie in mehreren öffentlichen Waschanstalten zu Paris in Gebrauch sind. Eine Trommel A A von Kupfer ist dazu bestimmt, die nasse Wäsche aufzunehmen, welche durch eine cylindrische Scheidewand in dieser Trommel verhindert wird, der Achse der letzteren zu nahe zu kommen. Die Wäsche wird durch einen Deckel von oben eingebracht, der nach Belieben geöffnet und durch starkes Andrücken wieder geschlossen werden kann. Mitten durch die Trommel geht die Achse B, welche mit ihr in fester Verbindung ist, und durch welche sie in Rotation versetzt werden kann. Die ganze Trommel ist ausserdem ringsum von einer zweiten, aber feststehenden Trommel umgeben, die ebenfalls von Kupfer und gross genug ist, dass sich die erste ungehindert in ihr drehen kann.

Um die Wäsche zu trocknen, dreht man die bewegliche Trommel rasch herum: man gibt ihr bis zu 1500 Umdrehungen in der Minute. Diese Drehung erzeugt in jedem Molekül der Wäsche und des Wassers, mit welchem sie getränkt ist, eine sehr bedeutende Centrifugalkraft. Dadurch wird die Wäsche stark gegen die Seitenwand der Trommel angepresst, während das Wasser durch die kleinen Löcher, welche in grosser Anzahl in dieser Wand angebracht sind, hindurchgeht und sich in dem unteren Theil der feststehenden Trommel sammelt, von wo es durch eine zu diesem Zweck angebrachte Oeffnung entleert werden kann. Wenn die Wäsche dieser Operation 10 bis 15 Minuten lang unterworfen worden ist, so hat sie fast alles Wasser verloren, welches sie enthielt, und es reicht hin, sie nur noch ganz kurze Zeit an der Luft aufzuhängen, um sie vollständig trocken zu bekommen.

Die Bewegung wird von einer horizontalen Achse C auf die vertikale Achse B mittelst eines Paars konischer Räder übertragen, welche unterhalb der Trommel angebracht sind. Die Achse C selbst erhält ihre Bewegung von einer andern Achse, welche ihr parallel ist und durch einen Riemen ohne Ende in Drehung versetzt wird. Hier handelt es sich aber darum, der Achse B und somit auch der Achse C eine sehr rasche Bewegung zu geben, und es würde erhebliche Schwierigkeiten haben, eine solche plötzlich hervorzubringen. Man hat desshalb dafür gesorgt, die Achse, auf welche der Treibriemen wirkt, mit der Achse C so zu verbinden, dass die letztere erst nach und nach in immer grössere Geschwindigkeit versetzt werden kann, bis sie endlich die Geschwindigkeit erreicht, welche die Operation verlangt. Zu dem Ende kann der Treibriemen nach und nach

auf verschiedene Rollen D, D′, D″ wirken. Die Rolle D ist auf der Achse befestigt, welche das Zahnrad E trägt; die Rolle D′ steckt auf einem hohlen Cylinder, welcher sich frei um jene Achse drehen kann und zugleich das Zahnrad E′ trägt; und die Rolle D″ endlich ist auf einem zweiten hohlen Cylinder befestigt, welcher sich um den vorhergehenden drehen kann und das Rad E″ trägt. Die Fig. 207 zeigt diese Anordnung im Durchschnitt. Wenn der Treibriemen auf der Rolle D liegt, so dreht diese Rolle das Rad E, welches in das auf der Achse C befestigte Rad F eingreift; zu gleicher Zeit setzen die Räder F′ und F″ die Räder E′ und E″ in Bewegung und diese wieder die Rollen D′ und D″, aber die Uebertragung der Bewegung auf die Achse C geschieht durch die Räder E, F allein, und es ist ganz ebenso, als wenn die Räder E′, E″, F′, F″ und die Rollen D′ und D″ nicht vorhanden wären. Wenn man in der Folge den Riemen von der Rolle D auf die Rolle D′ herüberschiebt, so dreht diese das Rad E′ und dieses setzt wieder mittelst des Rades F′, in welches es eingreift, die Achse C in Bewegung, und die Uebertragung der Bewegung geschieht ganz so, als ob die Rolle D′ und die Räder E′, F′ allein vorhanden wären. Wenn endlich der Riemen auf der Rolle D″ liegt, so wird die Bewegung mittelst der Räder E″, F″ auf die Achse C übertragen. Nun sieht man aus dem Verhältniss der Halbmesser der Räderpaare E, F, E′, F′ und E″, F″, dass die Achse C nach und nach in immer raschere Drehung versetzt wird, wenn man zuerst den Treibriemen über die Rolle D, dann über die Rolle D′ und endlich über die Rolle D″ leitet.

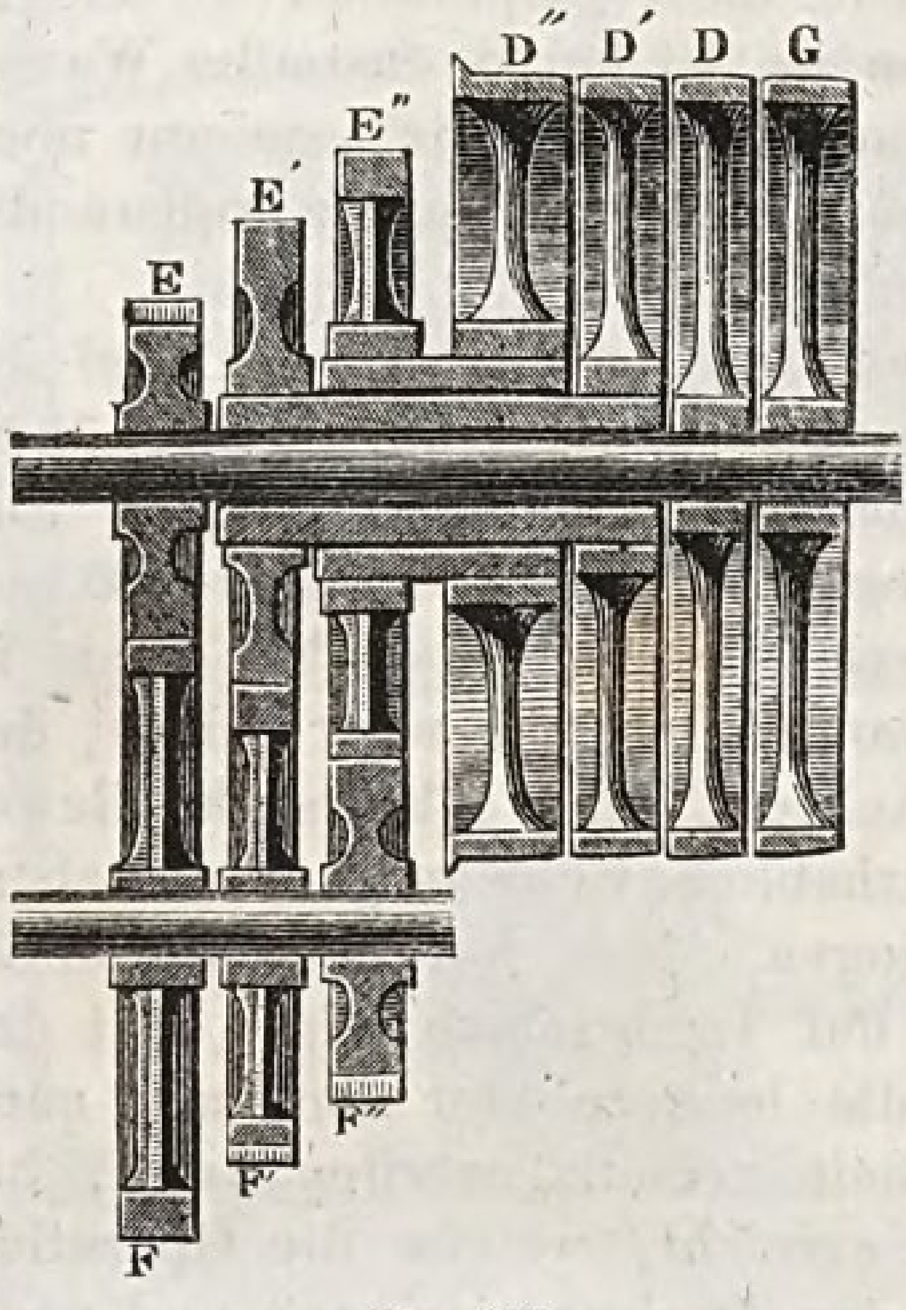


Fig. 207.

An der Seite der Rolle D befindet sich eine Leerrolle G, auf welche man den Riemen hinüberschiebt, wenn die Achse C nicht bewegt werden soll. Eine Gabel H (Fig. 206), welche den Riemen umfasst, dient dazu, ihn auf der einen oder andern Rolle festzuhalten. Wenn man den Riemen von einer Rolle auf die andere übertragen will, so darf man nur die Gabel herüber-

oder hinüberbewegen, was mittelst einer Schraube geschehen kann, welche sich in einer Kurbel K endigt. Die Gabel ist nämlich mit einer Schraubenmutter versehen, welche sich nach rechts oder links verschiebt, je nachdem man die Kurbel in dem einen oder entgegengesetzten Sinn dreht, und um die Gabel zu verhindern, an dieser Drehung Theil zu nehmen, wird sie in ihrer fortschreitenden Bewegung durch einen Schlitz geleitet, durch welchen sie hindurch geht und längs dessen sie fortgleiten muss.

§. 133. **Bewegung eines schweren Körpers auf einer schiefen Ebene.** — Wenn sich ein Körper, auf welchen blos die Schwerkraft wirkt, auf einer schiefen Ebene befindet, so bewegt er sich längs derselben herab. Sein Gewicht zerlegt sich, wie wir in §. 91 gesehen haben, in zwei Seitenkräfte: in eine zur schiefen Ebene senkrechte, welche keine Wirkung hervorbringt, und in eine zweite, zur schiefen Ebene parallele, welche allein die Bewegung des Körpers erzeugt. Das Verhältniss dieser letzteren Seitenkraft zum Gewicht des ganzen Körpers ist gleich dem Verhältniss der Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Länge. Da diese Seitenkraft fortwährend in derselben Stärke und nach derselben Richtung hin wirkt, so ertheilt sie dem Körper eine gleichförmig beschleunigte Bewegung, die jedoch langsamer ist als diejenige, welche er annehmen würde, wenn er unter der Wirkung seines ganzen Gewichts frei herabfiele; ihre Beschleunigung verhält sich, wie man leicht sieht, zur Beschleunigung der Schwere wie die Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Länge.

Mit Rücksicht auf diese Beschleunigung lässt sich dann auf diese gleichförmig beschleunigte Bewegung alles anwenden, was wir oben in Bezug auf eine solche Bewegung überhaupt sagten. Einige ebenso einfache als wichtige Beziehungen liefert uns noch die Anwendung der Sätze von dem Antrieb (§. 123) und der lebendigen Potenz (§. 124). — Wenn ein Körper die schiefe Ebene AB (Fig. 208), etwa von A bis D, herabläuft, so leistet, wie wir schon aus §. 37 wissen, die Schwerkraft eine Arbeit, welche gemessen wird durch ihre Grösse, hier das Gewicht des Körpers, multiplicirt mit dem in ihrer Richtung zurückgelegten Weg, also AE, vorausgesetzt, dass AC vertikal und DE senkrecht auf AC ist. Dieselbe Arbeit würde sie geleistet haben, wenn der Körper

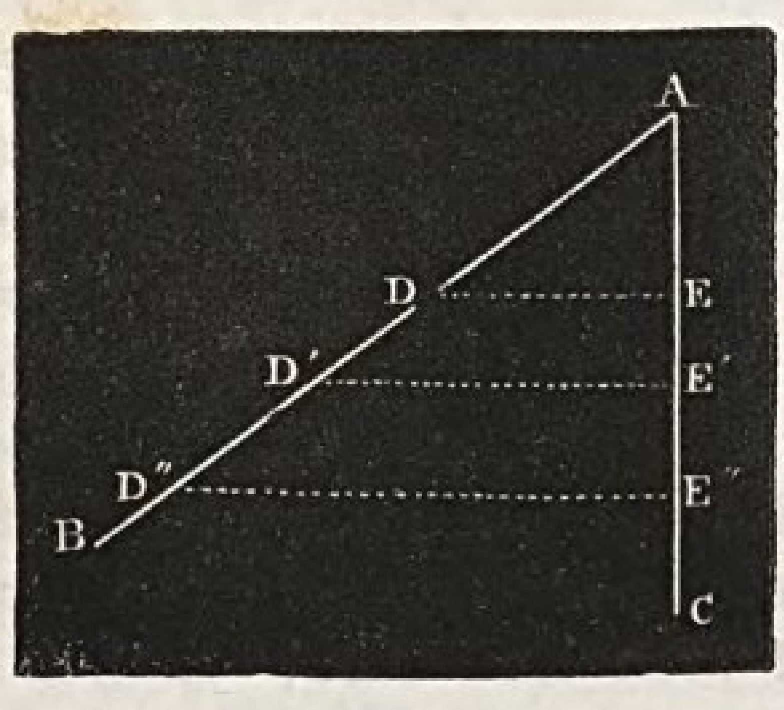


Fig. 208.

die Höhe AE frei durchfallen hätte. Alle diese Arbeit aber wird in beiden Fällen, da keine Widerstände zu überwinden sind, oder vielmehr, da wir von solchen absehen, als lebendige Potenz angesammelt. Diese muss daher in D, nachdem der Körper von A bis D gekommen ist, und in E, nachdem er die Höhe AE frei durchfallen hat, gleich gross sein und also auch die Geschwindigkeiten des Körpers in diesen beiden Punkten. Ein Körper also, der eine schiefe Ebene herabrollt, erhält in den Punkten D, D′, D″, dieselbe Geschwindigkeit, wie in den Punkten E, E′, E″, nachdem er die betreffenden Höhen frei durchfallen hätte, also die den Höhen AE, AE′, AE″ „entsprechenden“ Geschwindigkeiten (s. §. 115).

Anders ist es mit der Zeit, die der Körper braucht, um die Wege AD und AE zurückzulegen. Seine Geschwindigkeit ist am Ende dieser Wege, wie oben erwiesen, gleich, daher auch seine Bewegungsgrösse (s. §. 123). Der Antrieb der Kräfte, die dem Körper jene Wege AD und AE zu durchlaufen veranlassen, ist also ebenfalls gleich. Da aber die beiden Kräfte selber sich verhalten wie die Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Länge, wie AE zu AD, so müssen, damit jene Gleichheit der Antriebe stattfindet, die Zeiten zur Zurücklegung jener Wege denselben Grössen umgekehrt proportional sein. Es verhalten sich also die Zeiten, welche zum Durchlaufen der Wegstrecken AD und AE, oder AD′ und AE′ erforderlich sind, wie die Längen AD und AE oder AD′ und AE′ selbst.

Wenn man in einem Kreis (Fig. 209), dessen Ebene wir uns vertikal stehend denken, den vertikalen Durchmesser AC und die zwei Sehnen AB und BC zieht, und man stellt sich einen schweren Körper vor, der einmal die schiefen Ebenen AB oder BC herabrollt und ein andermal den vertikalen Durchmesser AC frei durchfällt, so verhalten sich den letzten Auseinandersetzungen zufolge, die Zeiten, welche zum Durchfallen der Höhe AD und zum Durchlaufen der Strecke AB gebraucht werden, wie AD zu AB selbst. Ferner verhalten sich die Höhen AD und AC wie die Quadrate der Zeiten, die zu ihrem Durchfallen nothwendig sind, also umgekehrt diese Zeiten wie die Quadratwurzeln aus den Höhen AD und AC. Genau so verhalten sich aber, da AB bekanntlich die mittlere geometrische Proportionale zwischen AD und AC ist, die Stücke AD und AB

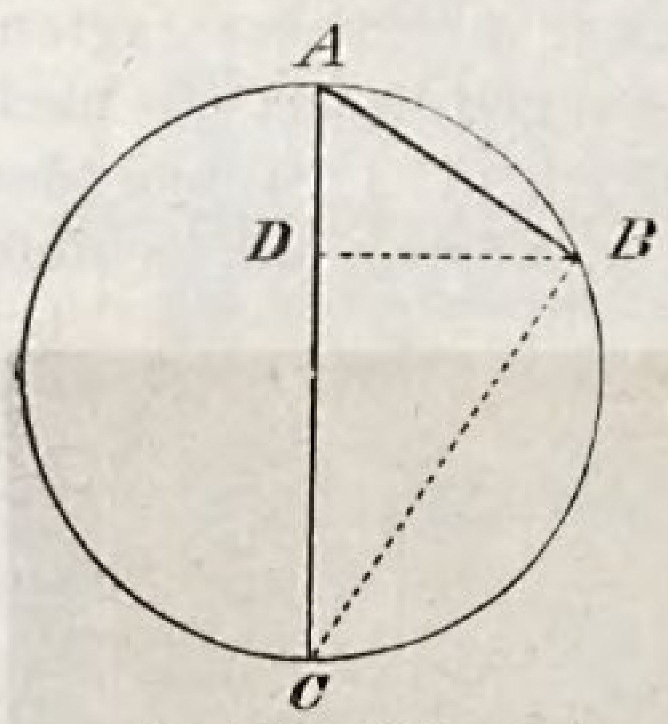


Fig. 209.

und daraus folgt, dass der Körper gleich lang braucht, ob er den vertikalen Durchmesser AC frei durchfällt oder die Sehne AB herabrollt. Oder zwei Körper, zu gleicher Zeit aus A abgehend, kommen, der eine auf dem Wege AC, der andere auf dem AB, zu gleicher Zeit in C und B an. — Das Gleiche gilt für die Sehne BC und daraus folgt der merkwürdige Satz: In einem vertikalen Kreis wird der vertikale Durchmesser in derselben Zeit durchlaufen als irgend eine, von einem seiner Endpunkte ausgehende Sehne, diese als schiefe Ebenen betrachtet, die der Körper herabrollt.

Wenn ein schwerer Körper längs einer schiefen Ebene AB (Fig. 210) von unten nach oben geworfen wird, wie es der Pfeil anzeigt, so wird seine Geschwindigkeit durch die Wirkung seines Gewichtes, dessen eine, zur schiefen Ebene parallele Seitenkraft ihn am Emporsteigen zu hindern sucht, verzögert. Die Veränderung der Geschwindigkeit, welche stattfindet, indem der Körper von D nach D′ hinaufsteigt, ist offenbar genau so gross, als die Vergrösserung, welche die Geschwindigkeit erfahren würde, wenn er sich in entgegengesetzter Richtung dieselbe Strecke die schiefe Ebene herabbewegen würde. Wenn daher der Körper in D eine Geschwindigkeit besitzt, welche der Höhe CD entspricht, so hat seine Geschwindigkeit in D′ nur noch die Grösse, wie sie aus der Höhe C′D′ folgt, vorausgesetzt, dass die Punkte C und C′ in der nämlichen Horizontallinie liegen.

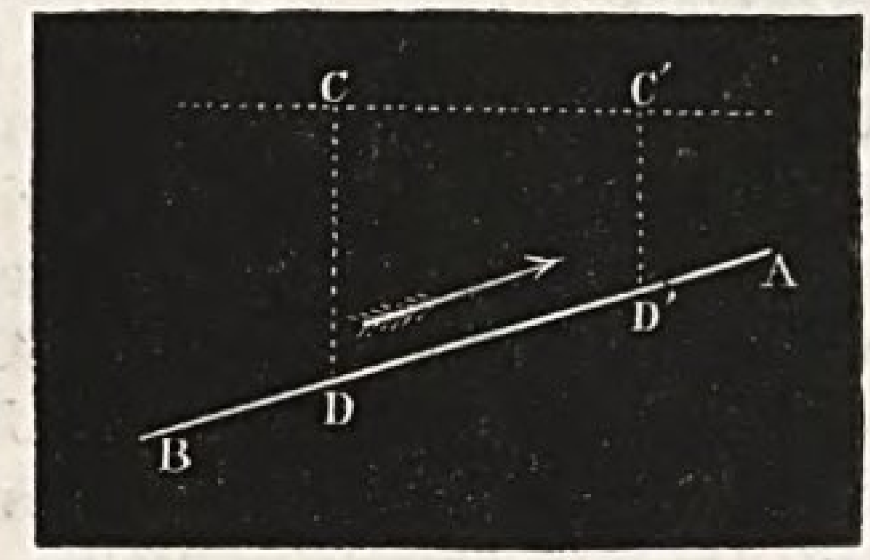


Fig. 210.

§. 134. Bewegung eines schweren Körpers auf einer krummen Linie. — Wenn sich ein schwerer Körper längs einer krummen Linie ABC (Fig. 211) bewegt und von dem Punkte A ausgehend abwärts steigt, so wird seine Geschwindigkeit immer grösser und grösser, bis er endlich in dem tiefsten Punkt B angelangt ist. Bis hieher ist die Arbeit der Schwere genau die nämliche, als wenn der Körper die vertikale Höhe AF frei durchfallen

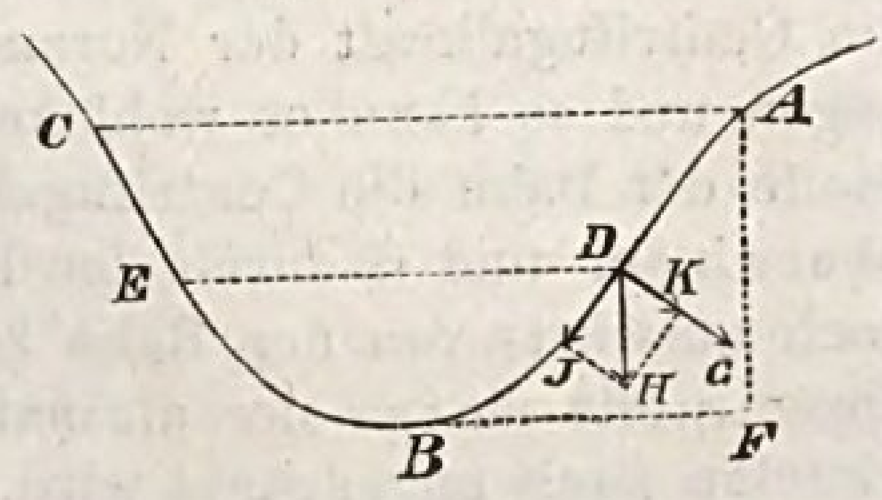


Fig. 211.

hätte. Vorausgesetzt also, dass der Körper keinerlei Hindernisse gegen seine Bewegung findet, so hat er im Punkte B die nämliche lebendige Potenz und folglich die nämliche Geschwindigkeit als er in dem Punkte F erhalten haben würde, wenn er die Höhe AF frei herabgefallen wäre, oder kürzer: im Punkte B entspricht seine Geschwindigkeit der Höhe, um welche der Punkt B unter der Horizontalen AC gelegen ist. In Folge dieser gewonnenen Geschwindigkeit steigt nun der Körper gegen den Punkt C hin an; aber die Schwere sucht nun fortwährend seine Bewegung zu verzögern; seine Geschwindigkeit vermindert sich, sodass er, in dem Punkt E angelangt, nur noch die Geschwindigkeit besitzt, die er hatte, als er durch den Punkt D ging, der mit E in einer Horizontalen gelegen ist. So lange also der Körper noch nicht in dem Punkte C, der auf derselben Horizontallinie wie A liegt, angekommen ist, hat er immer noch eine aufwärts gerichtete Geschwindigkeit, aber sobald er den Punkt C erreicht, wird seine Geschwindigkeit Null, und nun fällt er in Folge der Wirkung der Schwere wieder herab, bis zu dem Punkte B, über welchen er in Folge seiner gewonnenen Geschwindigkeit hinausgeht, um wieder bis zu dem Punkte A hinaufzusteigen, von welchem er wieder herabfällt u. s. f. ins Unendliche; vorausgesetzt natürlich, dass sich der Bewegung keinerlei Hindernisse entgegensetzen.

Da wir auf diese Weise die Geschwindigkeit des Körpers an irgend einer Stelle D seiner Bahn sehr leicht berechnen können, so ist auch die Centrifugalkraft DG leicht zu bestimmen, vorausgesetzt, dass man den Krümmungskreis der Bahn an dieser Stelle kennt. Ausserdem wirkt auf den Körper natürlich noch sein Gewicht DH als vertikal abwärts gerichtete Kraft. Dieselbe zerlegt sich in eine Tangentialkraft DJ und in eine Normalkraft DK. Die erstere ist es allein, welche die Geschwindigkeit des Körpers in seiner Bahn ändert; die letztere setzt sich mit der Centrifugalkraft DG zusammen und gibt mit derselben den Druck normal gegen die Bahn. Dabei addiren sich beide, wenn die Bahn nach unten convex ist, wie in unserer Figur. Im andern Fall wirkt die Centrifugalkraft der Normalcomponente der Schwerkraft entgegen und so kann es wohl kommen, dass an einer geeigneten Stelle der Bahn die Centrifugalkraft die Schwerkraftscomponente überwindet und dadurch der Körper das Bestreben erhält, sich nach aufwärts von der Bahn zu entfernen und so, wenn er an dieser Stelle u n t e r der als materiell gedachten Bahn liegt, gegen dieselbe noch angedrückt wird. Ein hübsches Beispiel dafür gibt die sog. Centrifugaleisenbahn. ABCDE (Fig. 212) stellt die

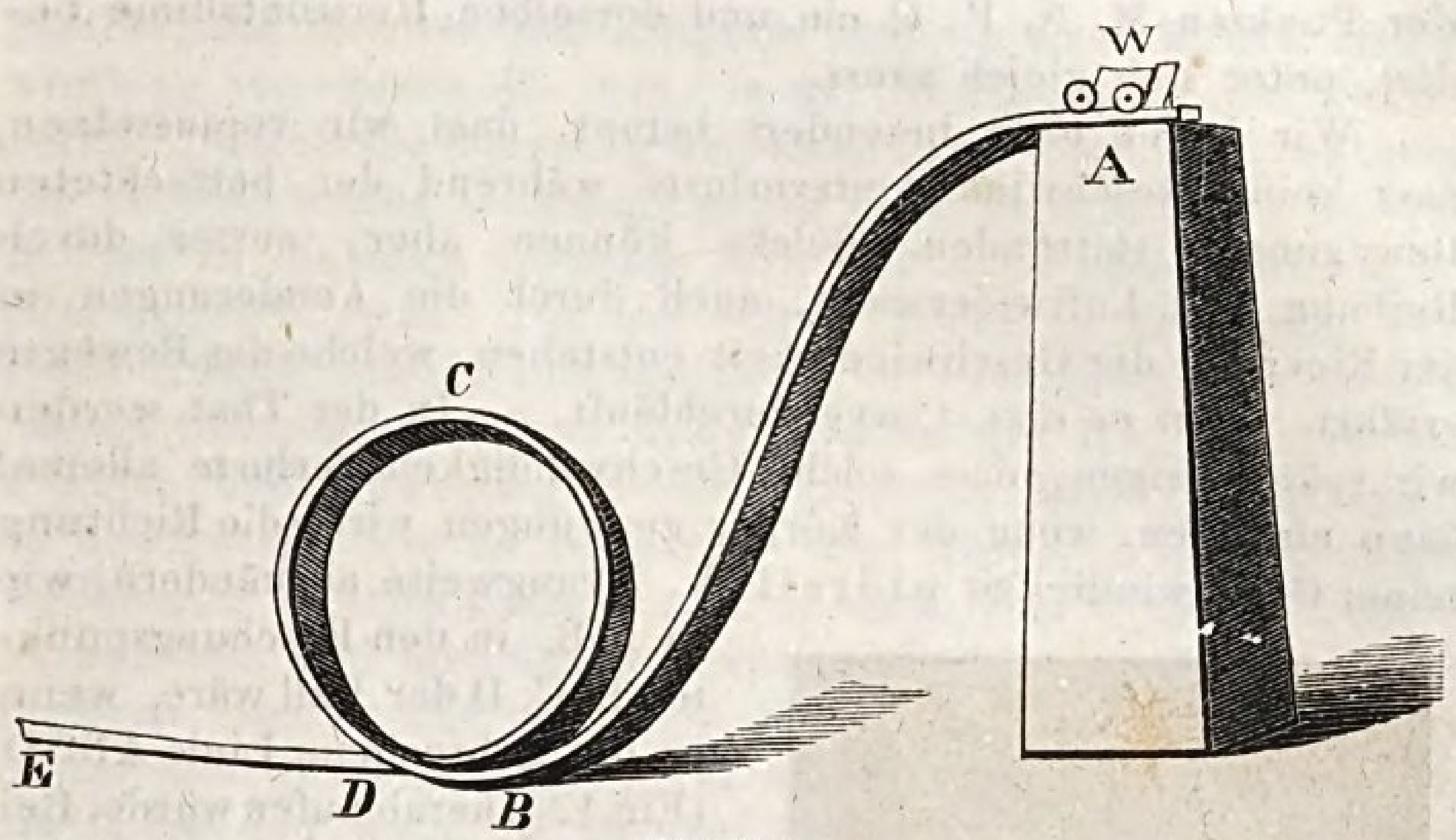


Fig. 212.

Schiene dar, auf welcher das ziemlich schwere Wägelchen W, das jetzt noch auf der Plattform A steht, läuft. Nachdem dieses Wägelchen von A bis B herabgekommen ist, besitzt es eine solche Geschwindigkeit, dass es den oberen Theil der Schlinge BCD, indem es gleichsam unten an der Bahn hängt, durchlaufen kann, ohne in Folge seines Gewichtes herabzufallen.

Wenn sich der schwere Körper auf der Linie ABCDE (Fig. 213) bewegen muss und von dem Punkte A ausgeht, so steigt er bis zu dem Punkt B herab, erhebt sich wieder bis C, durch welchen Punkt er mit bestimmter Geschwindigkeit hindurchgeht, um bis D herabzusteigen, bis er sich endlich bis zu dem Punkte E erhebt, der mit A in derselben Horizontallinie liegt. Nachdem seine Geschwindigkeit

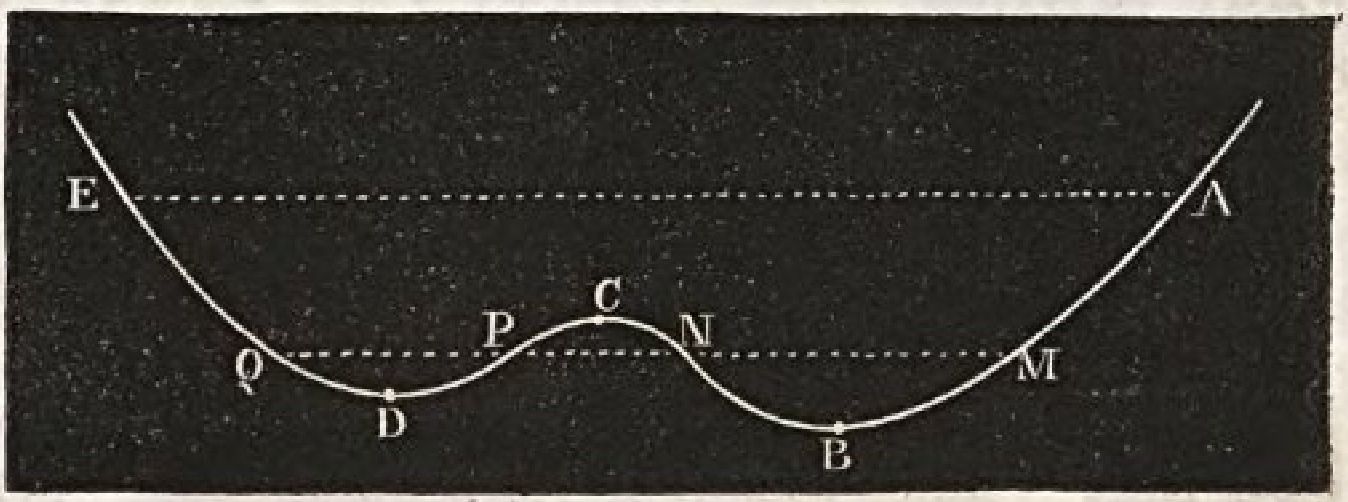


Fig. 213.

in diesem Punkte E Null geworden ist, führt ihn die fortdauernde Wirkung der Schwere wieder in entgegengesetzter Richtung herab, sodass er den Weg EDCBA durchläuft, um in A einen Augenblick stehen zu bleiben und sodann wieder umzukehren u. s. f. Bei dieser Bewegung ist die Geschwindigkeit des Körpers jedesmal, wenn er sich auf der nämlichen Horizontallinie befindet, dieselbe; so sind die Geschwindigkeiten, welche er in den

vier Punkten M, N, P, Q ein und derselben Horizontallinie besitzt, unter sich gleich gross.

Wir haben oben besonders betont, dass wir voraussetzen, dass keine Geschwindigkeitsverluste während der betrachteten Bewegungen stattfinden. Solche können aber, ausser durch Reibung und Luftwiderstand, auch durch die Aenderungen in der Richtung der Geschwindigkeit entstehen, welche das Bewegte erfährt, wenn es eine Curve durchläuft. — In der That werden wir später zeigen, dass solche Geschwindigkeitsverluste allemal dann eintreten, wenn der Körper gezwungen wird, die Richtung seiner Geschwindigkeit plötzlich, sprungweise abzuändern, wie es z. B. in den Brechungspunkten B, C, D der Fall wäre, wenn er die gebrochene Linie ABCD (Fig. 124) herablaufen würde. Bei der allmähligen Aenderung in der Richtung der Geschwindigkeit aber, wie sie in einer Curve (Fig. 211 oder 213) stattfindet, treten, wie wir später erweisen werden, solche Geschwindigkeitsverluste nicht ein.

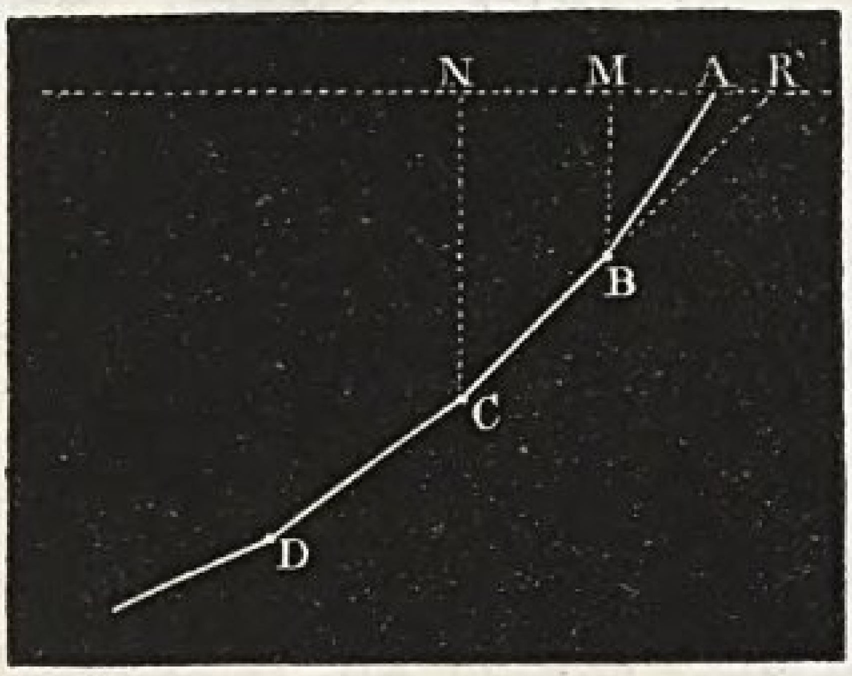


Fig. 214.

§. 135. **Das Pendel.** — Wenn ein sehr kleiner, schwerer Körper A (Fig. 215), eine Bleikugel zum Beispiel, an dem untern Ende eines sehr feinen Fadens, der als gewichtlos betrachtet werden kann, und dessen oberes Ende festgemacht ist, aufgehängt wird, so erhält man dadurch ein Pendel. Der Körper A ist nur dann im Gleichgewicht, wenn der Faden vertikal ist, und in diesem Fall hat man nichts anderes als ein Bleiloth (s. §. 20), dessen man sich bedient, um zu erkennen, ob eine Linie oder eine Ebene vertikal steht. Wenn man aber den Körper A aus seiner Lage bringt und ihn in die Fig. 216 dargestellte Stellung versetzt, so ist das Gleichgewicht

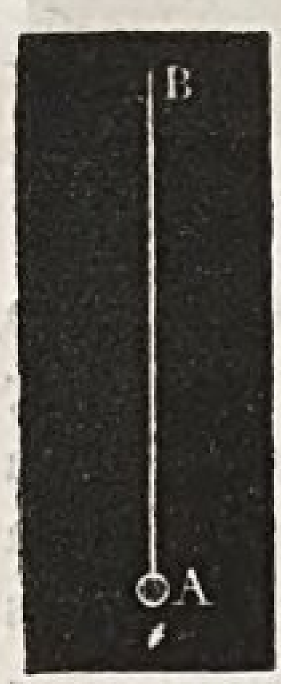


Fig. 215

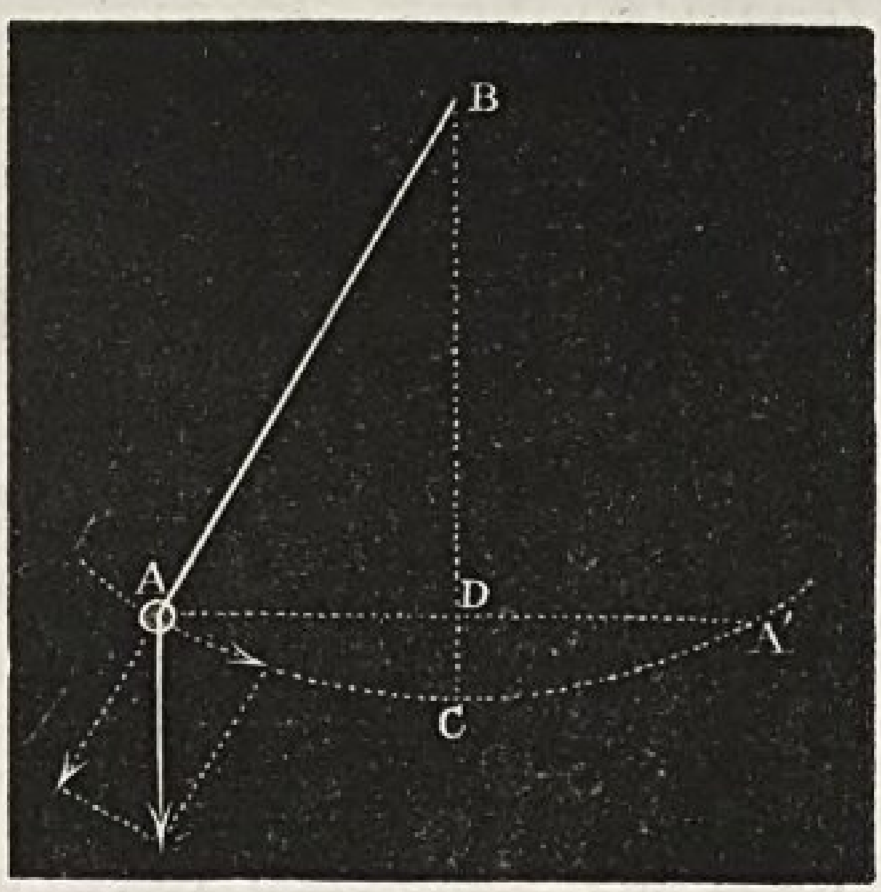


Fig. 216.

gestört; das Gewicht des Körpers kann in zwei Kräfte zerlegt werden, von denen die eine, in der Verlängerung des Fadens gelegen, durch die Spannung desselben aufgehoben wird, während die andere, welche senkrecht gegen den Faden gerichtet ist, den Körper in diejenige Stellung zurückzuführen sucht, wo er im Gleichgewicht war. Der auf solche Weise in Bewegung versetzte Körper bewegt sich offenbar in der Peripherie eines Kreises, dessen Centrum in B und dessen Halbmesser BA ist, und wir können diese Bewegung in einer krummen Linie offenbar ganz so betrachten, wie im vorigen §. Der Körper wird mit immer wachsender Geschwindigkeit von A nach dem tiefsten Punkt C herabgehen, und hier angekommen wird er eine Geschwindigkeit besitzen, welche der vertikalen Höhe DC entspricht; in Folge dieser Geschwindigkeit steigt er auf der andern Seite wieder in die Höhe und zwar bis zu dem Punkt A', der mit A in einer Horizontallinie gelegen ist; von dem Punkt A' geht er dann wieder abwärts, um nach dem Punkt A zurückzukehren u. s. f. Auf diese Weise macht das Pendel zwischen den beiden äussersten Lagen BA und BA' eine Reihe von Schwingungen, die sich bis ins Unendliche forterhalten würden, wenn keine äusseren Einflüsse die Bewegung beeinträchtigten. Wenn man in Wirklichkeit den Versuch macht, findet man, dass die Schwingungen allerdings eine Zeit lang fortdauern, dass aber die Amplitude der Schwingungen, d. h. der Winkel ABA', welchen die beiden äussersten Stellungen des Pendels mit einander bilden, und damit auch der Schwingungsbogen ACA' nach und nach immer kleiner und kleiner und zuletzt ganz Null wird, wo dann das Pendel in seine Gleichgewichtslage zurückgekehrt ist. Diese Verminderung der Schwingungsbögen entspringt aus dem Widerstande der Luft, welcher sich der Bewegung des Pendels entgegensetzt, sowie aus dem Widerstande der sich stets in dem Aufhängepunkt darbietet, auf welche Art auch die Aufhängung bewerkstelliget sein mag.

§. 136. Die Zeit, welche das Pendel braucht, um aus der Lage BA in die entgegengesetzte BA' überzugehen, heisst die Dauer einer Schwingung oder kurz Schwingungsdauer, und es ist die wichtigste Aufgabe der Betrachtungen über das Pendel festzustellen, in welcher Weise diese Schwingungsdauer von den verschiedenen Umständen, die hier in Betracht kommen, abhängt.

Solche Umstände aber gibt es nur drei: Nämlich 1) die Grösse der Schwingungen, 2) das Gewicht und die Materie des aufgehängten Körpers und endlich 3) die Länge des Fadens oder überhaupt des Pendels.

Wenn man zwei ganz gleiche Pendel hinter einander aufhängt, sodass keines das andere in seiner Bewegung hindern kann, und man lenkt das eine unter einem kleinern, das andere unter einem grössern Winkel von seiner Gleichgewichtslage ab, so sieht man, wenn man sie mit einander ihre Bewegung beginnen lässt, dass sie ihre Schwingungen genau in derselben Zeit machen, vorausgesetzt dass dieselben bei beiden nicht gross sind. Bei kleinen Schwingungen ist also die Schwingungsdauer unabhängig von der Grösse der Schwingungen, oder die Schwingungen sind, wie man sagt, isochron. Man kann sich davon auch durch folgende einfache Betrachtung überzeugen. Es seien BA und BD (Fig. 217) die beiden hinter einander aufgehängten Pendel, und das eine BA werde gerade um den doppelten Winkel von der Gleichgewichtslage abgelenkt als das andere BD. Man denke sich die beiden, auf die Körper A und D wirkenden vertikalen Kräfte, ihre Gewichte, die unserer Voraussetzung nach genau gleich sind, wie oben in zwei Seitenkräfte zerlegt, von denen die eine in der Richtung des Fadens, die andere senkrecht dazu wirkt. Wenn dann der Winkel ABC nur klein, d. h. nicht über 8° ist, so kann ohne merklichen Fehler angenommen werden, dass sich die beiden zur Richtung des Fadens senkrechten Kräfte wie die Winkel verhalten, um welche die Pendel aus ihrer Gleichgewichtslage abgelenkt wurden, dass also die in A wirkende Kraft doppelt so gross als die in D ist. Wenn man sich nun eine sehr kleine Zeit denkt, in welcher sich die beiden Pendel zugleich vorwärts bewegen, so kann man die in dieser Zeit beschriebenen Wege Aa und Dd als gerade betrachten, und also annehmen, dass sich die Körper A und D auf den schiefen Ebenen Aa und Dd mit gleichförmig beschleunigten Bewegungen und zwar mit Beschleunigungen, welche bezüglich den in A und D wirkenden Tangentialcomponenten proportional sind, abwärts bewegt haben. Dann folgt aus dem §. 114, dass Aa doppelt so gross als Dd, und dass die in a erlangte Geschwindigkeit das Doppelte von der in d ist. Da aber dann auch der Winkel aBC noch doppelt so gross als der Winkel dBC ist,

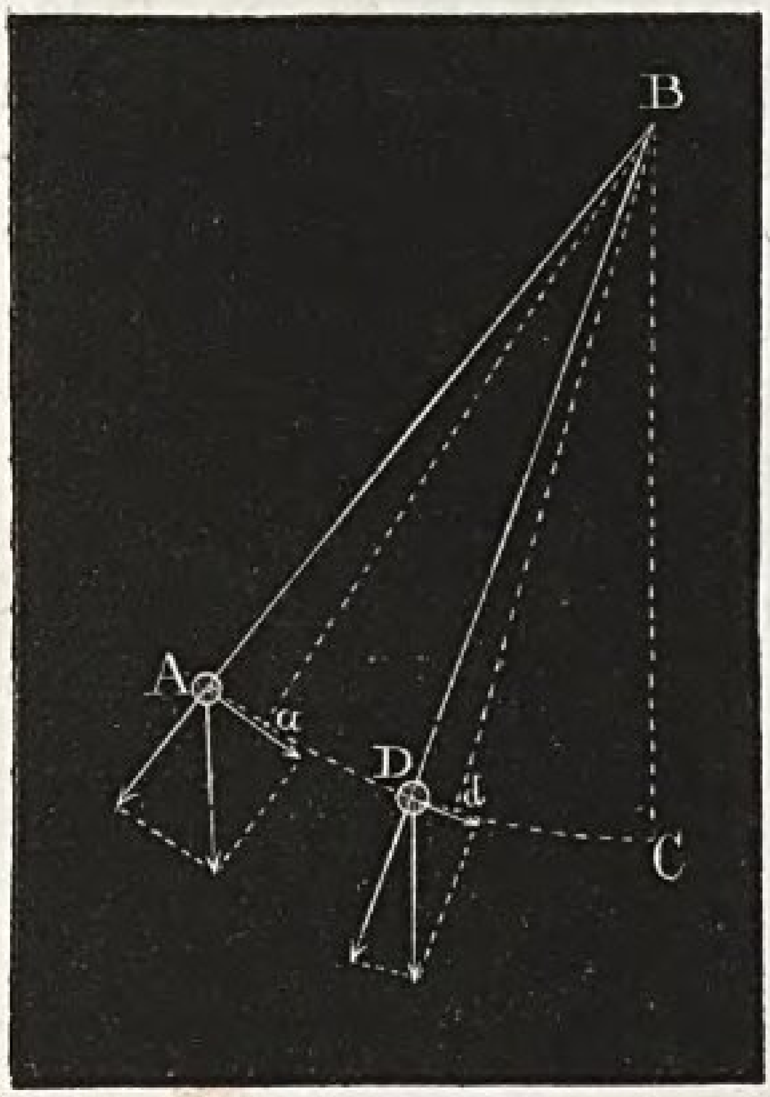


Fig. 217.

so ist die zur Richtung des Fadens senkrechte Seitenkraft in *a* wieder doppelt so gross als in *d*, und in der nächsten sehr kleinen Zeit wird folglich von *a* aus wieder der doppelt so grosse Weg zurückgelegt als von *d* aus u. s. f. In denselben kleinen Zeitintervallen beschreibt also der Körper A immer die doppelten Wege des Körpers D, er kommt also gleichzeitig mit D in C an, woraus folgt, dass die Schwingungsdauer beider Pendel gleich gross ist.

Die Bewegung eines Körpers auf der schiefen Ebene ist, wie die des freien Falls für alle Körper dieselbe. Da nun der Kreisbogen, welchen der an dem Faden aufgehängte Körper eines Pendels beschreibt, als eine Aufeinanderfolge von kleinen schiefen Ebenen angesehen werden kann, so ist klar, dass die Bewegung eines Pendels und damit auch seine Schwingungsdauer unabhängig von dem Gewichte und der Materie des aufgehängten Körpers ist. Es rührt dies, wie man sich erinnert, davon her, dass ein Körper von dem doppelten Gewichte z. B. auch die doppelte Masse hat und ihm daher die zwar doppelt so grosse Schwerkraft doch nur die nämliche Beschleunigung ertheilen kann. Wenn aber auf einen Körper von derselben Masse die Schwerkraft mit grösserer Intensität wirken würde, als auf einen anderen, so würde seine Bewegung beim freien Fall sowohl, wie auf der schiefen Ebene und beim Pendel mit grösster Beschleunigung, also schneller stattfinden. Dies kommt in der That vor. Unter dem Aequator, ist sowohl in Folge der Anschwellung der Erde dortselbst als auch in Folge der grösseren Centrifugalkraft, die sich dort geltend macht (vgl. §. 130), das Gewicht eines und desselben Körpers, wenn auch nur wenig, doch etwas kleiner als an anderen Orten der Erde. Es ist also dortselbst auch die Beschleunigung der Schwere geringer, und foglich fällt ein Körper langsamer, läuft langsamer eine schiefe Ebene herab und sind die Schwingungen eines Pendels von grösserer Dauer.

Als der französische Astronom *Richer* im Jahre 1671 mit seiner Pendeluhr von Paris nach Cayenne reiste, welches nur 5° nördlich vom Aequator liegt, fand er, dass diese Uhr, welche in Paris genau gegangen war, täglich um $2^1/_2$ Minuten zurückblieb.

In welcher Weise die Schwingungsdauer eines Pendels von der Beschleunigung der Schwere abhängt, ist leicht zu finden. Denken wir uns, es seien BA und *ba* (Fig. 218) zwei gleich lange Pendel mit gleich grossen Schwingungsbögen. Die aufgehängten Körperchen A und *a* sollen gleiche Massen haben, aber

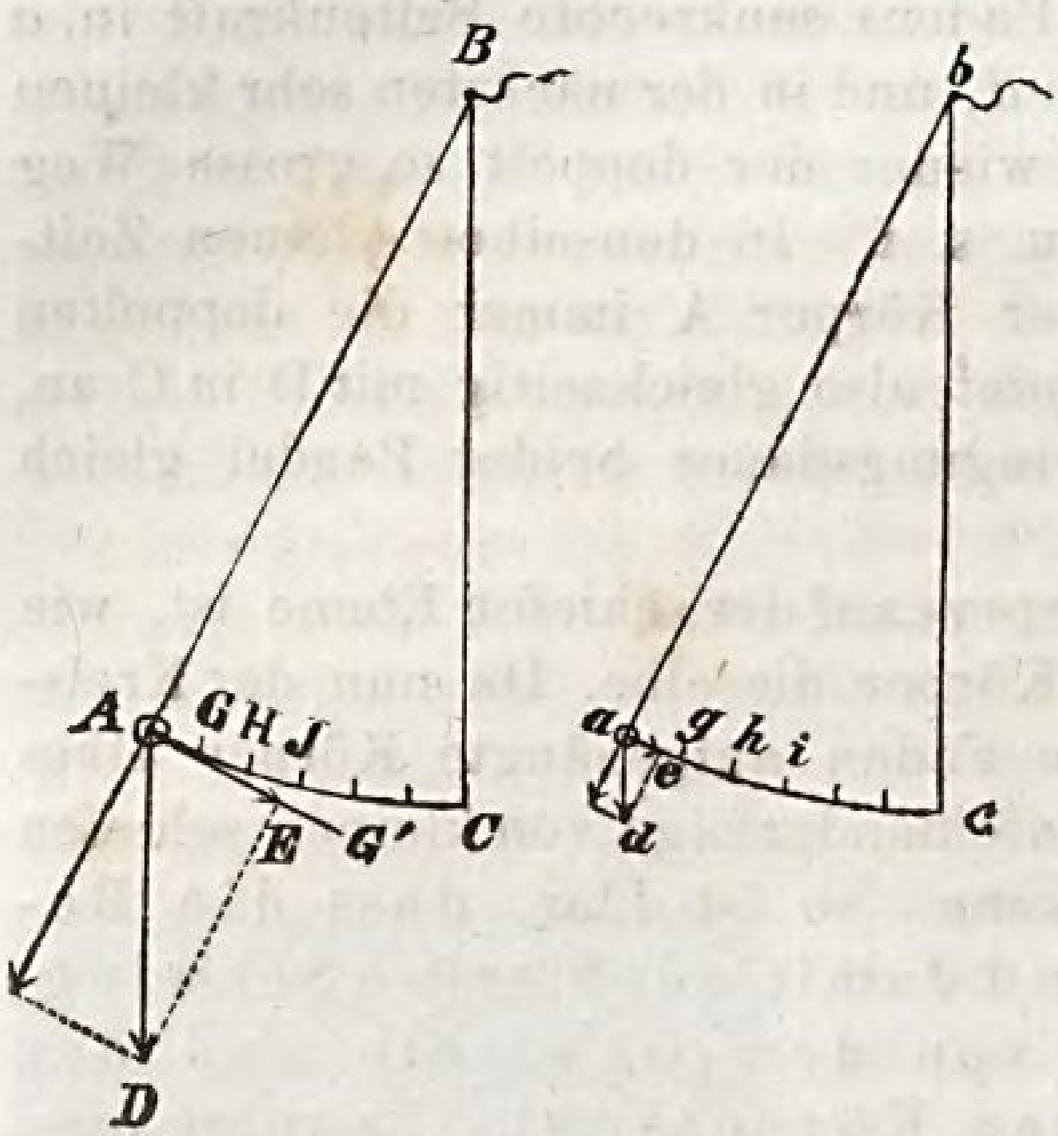


Fig. 218.

auf A wirke die Schwere mit 4 mal so grosser Intensität als auf *a*, sodass die vertikal abwärts wirkende Kraft A D 4 mal so gross als die *a d* ist. Dann ist auch die Tangentialcomponente A E 4 mal so gross als die *ae* und in demselben Verhältniss stehen die Beschleunigungen, welche den Molekülen A und *a* in ihren Bahnen ertheilt werden. Denken wir uns nun, wie oben schon, die Bögen A C, *a c* in eine gleich grosse und so grosse Menge gleicher Theile getheilt, dass wir dieselben als lauter kleine schiefe Ebenen betrachten können, so würde in derselben Zeit, in welcher *a* die erste *ag* dieser kleinen schiefen Ebenen herabläuft, A einen 4 mal so grossen Weg AG' machen. Oder wenn A auch nur die erste kleine schiefe Ebene A G herabkommen soll, so gebraucht es dazu, da die Wege auf der schiefen Ebene wie beim freien Fall den Quadraten der Zeiten proportional sind, nur die Hälfte der Zeit. Das Gleiche lässt sich für alle folgenden schiefen Ebenen G H und *gh*, H I und *hi* etc. etc. erweisen und in Summe ist daher die Schwingungsdauer des Pendels B A halb so gross als die des Pendels *ba* und allgemein die Schwingungsdauer eines Pendels der Quadratwurzel aus der Beschleunigung der Schwere umgekehrt proportional.

Schon die einfachste Beobachtung zeigt, dass sich die Schwingungsdauer eines Pendels mit der Länge desselben verändert und zwar in der Weise, dass ein längeres Pendel langsamer schwingt als ein kürzeres. Die Schwingungsdauer ist der Quadratwurzel aus der Pendellänge porportional. Um also Pendel zu erhalten, deren Schwingungsdauer sich verhält wie 1 zu 2 zu 3, muss man denselben Längen geben, welche den Zahlen 1, 4, 9 proportional sind. Dieses Gesetz kann man durch den Versuch auf folgende Art beweisen: Man hängt zwei Pendel, von denen das eine viermal so lang als das andere ist, in zwei Punkten, welche auf derselben Horizontallinie gelegen sind, so hintereinander auf, dass sie sich in ihrer Bewegung gegenseitig

nicht hindern können. Wenn man diese beiden Pendel nach der nämlichen Seite hin und um denselben Winkel aus ihrer Gleichgewichtslage entfernt, wie es Fig. 219 zeigt, und sie alsdann zu gleicher Zeit loslässt, so nehmen sie nach und nach die gegenseitigen Stellungen ein, wie sie in den Figuren 220, 221, 222 dargestellt sind. Nach einer ganzen Schwingung des kleinen Pendels hat das grosse erst eine halbe Schwingung gemacht (Fig. 220); während dieses alsdann seine Schwingung vollendet, ist das andere bereits an seinen Ausgangspunkt wieder zurückgekehrt (Fig. 221). Wenn alsdann das längere von beiden Pendeln eine halbe Schwingung im entgegengesetzten Sinn gemacht hat, hat das kleinere bereits eine dritte Schwingung vollendet (Fig. 222), und wenn das grössere Pendel endlich in seine erste Lage zurückgekehrt ist, wird auch das kleinere wieder in dieselbe zurückgekommen sein, sodass sich nun beide wieder unter denselben Umständen befinden, wie zu Anfang der Bewegung. Das kleine Pendel macht also zwei Schwingungen, während das grosse eine macht.

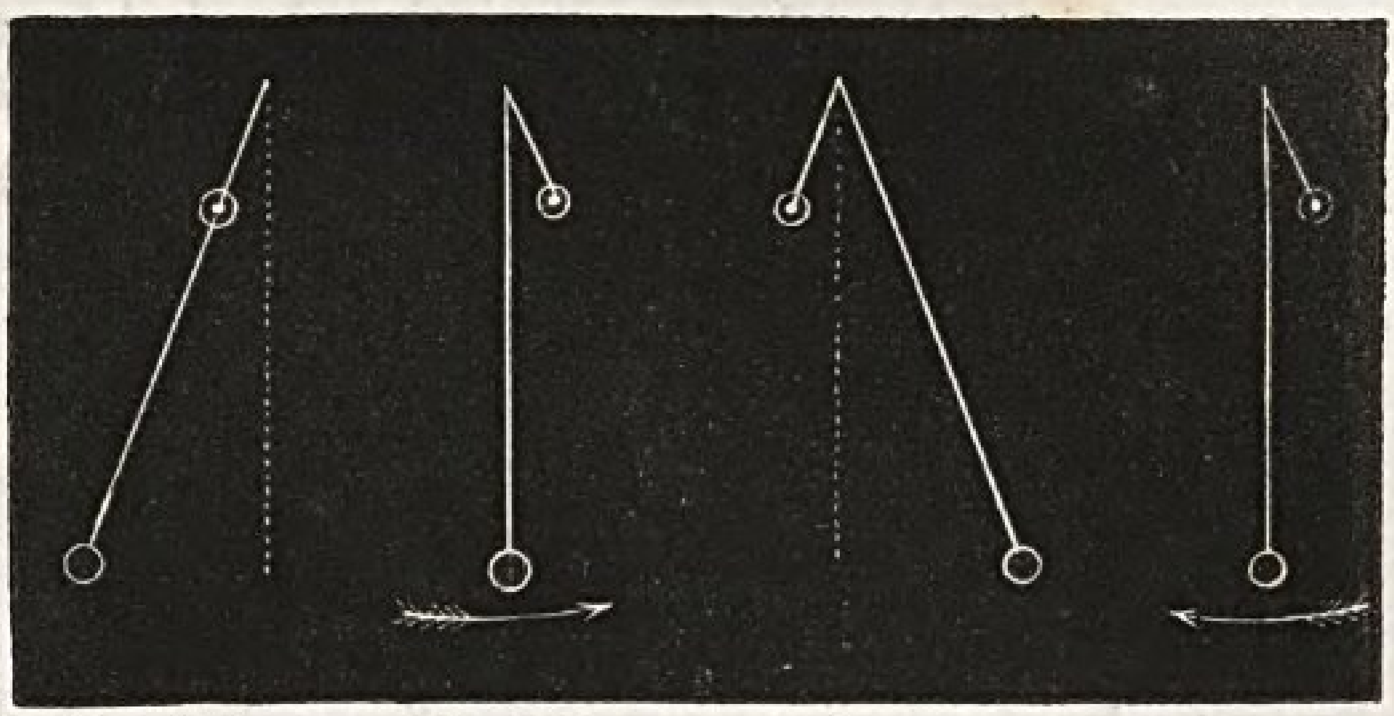


Fig. 219. Fig. 220. Fig. 221. Fig. 222.

Es lässt sich das oben ausgesprochene Gesetz für die Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Pendels von seiner Länge auf sehr einfache Weise auch theoretisch ableiten. Sei BA (Fig. 223) wieder ein Pendel und Ba ein viermal so kurzes mit gleich grosser Amplitude. Auf die aufgehängten Körperchen A und a wirke die Schwere mit gleicher Intensität; es seien also die Kräfte AD, ad sowohl, wie ihre Tangentialcomponenten AE, ae gleich gross. Aber der Bogen AC ist viermal so lang als der Bogen ac. Denken wir uns daher wieder beide Bögen in eine gleiche Anzahl gleicher Theile von solcher Menge getheilt, dass

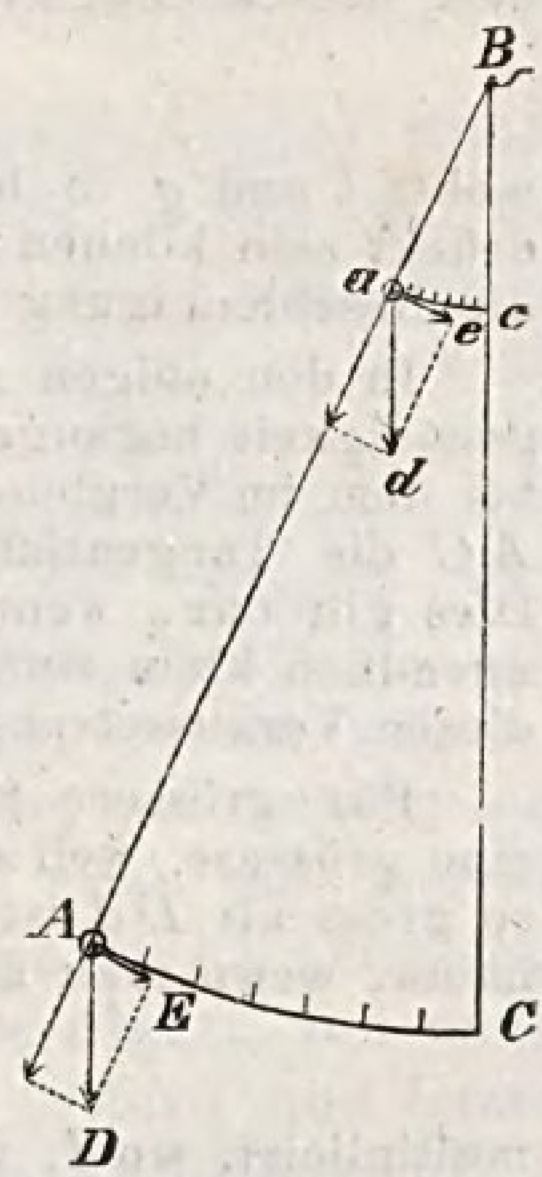


Fig. 223.

wir sie als kleine schiefe Ebenen betrachten können, so ist jede derselben beim kürzeren Pendel 4mal so kurz als beim längeren. Da nun wieder die Wege den Quadraten der Zeiten, in welchen sie durchlaufen werden, proportional sind, so durchläuft das Molekül a die einzelnen schiefen Ebenen in der halben Zeit, als das Molekül A die seinigen, d. h. die Schwingungsdauer des 4 mal so kurzen Pendels ist halb so gross, oder die Schwingungsdauer ist der Quadratwurzel aus der Pendellänge proportional.

Bezeichnet man mit l die Länge des Pendels und mit g die Beschleunigung der Schwere, so ist nach obigen Entwicklungen die Schwingungsdauer der Grösse $\sqrt{\frac{l}{g}}$ proportional und kann daher gleich $\alpha\sqrt{\frac{l}{g}}$ gesetzt werden, wo α einen für alle Pendel gleich grossen Factor bezeichnet. Derselbe kann durch Versuche leicht ermittelt werden. Man darf nur die Schwingungsdauer eines Pendels von bekannter Länge an einem Ort der Erde bestimmen, für welchen g bekannt ist. Aber es kann der Werth von α auch theoretisch gefunden werden, indem man sich den ganzen halben Schwingungsbogen in eine sehr grosse Menge kleiner Theile, schiefer Ebenen, getheilt denkt und die Zeit berechnet, die der Körper braucht, um sie nach und nach herabzulaufen. Man findet dabei, freilich nur mittelst einer ziemlich schwierigen Rechnung, für α die sog. Ludolph'sche Zahl $\pi = 3{,}14159\,..$ $\left(\text{nahezu } 3\tfrac{1}{7} \text{ oder noch näher } \tfrac{355}{113}\right)$, welche das Verhältniss des Durchmessers eines Kreises zu seiner Peripherie angibt. Es ist folglich die Schwingungsdauer eines Pendels, dessen Länge l ist,

$$t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

wobei l und g in beliebigen, aber gleichen Maasseinheiten ausgedrückt sein können und die Einheit für t die Secunde ist, wie g die Beschleunigung der Schwere in der Secunde bezeichnet.

In den obigen Auseinandersetzungen haben wir nur eine Ungenauigkeit begangen, als wir nämlich annahmen, dass in Fig. 217 bei dem im Vergleich zu DC doppelt so grossen Schwingungsbogen AC die Tangentialcomponente Aa doppelt so gross als Dd sei. Dies gilt nur, wenn die Schwingungsbögen sehr klein, eigentlich unendlich klein sind, und daher ist obige Formel auch nur unter dieser Voraussetzung richtig.

Für grössere Schwingungsbögen wird die Schwingungsdauer eine grössere, weil Aa (Fig. 217) in Wirklichkeit nicht ganz doppelt so gross als Dd ist. Man erhält dann die Schwingungsdauer genauer, wenn man den obigen Werth für t mit der Zahl

$$1 + \frac{1}{8}\frac{h}{l}$$

multiplicirt, wo l, wie oben, die Pendellänge und h die Höhe DC (Fig. 216) bezeichnet. Wie klein übrigens die dadurch erzielte

Aenderung ist, sieht man daraus, dass für eine Amplitude von 16° jener Factor erst 1,004853, also von 1 um weniger als $1/_{200}$ verschieden ist.

Wenn man umgekehrt die Schwingungsdauer eines Pendels beobachtet, so ist dieselbe in Wirklichkeit etwas grösser, als obige Formel für t angibt. Dividirt man aber die beobachtete Schwingungsdauer mit obiger Zahl $1 + \frac{1}{8}\frac{h}{l}$, so kann man jene einfache Formel auf sie anwenden. Man sagt dann, man habe die Schwingungsdauer auf unendlich kleine Bögen reducirt.

§. 137. Die vorhergehenden Entwicklungen für die Schwingungsdauer eines Pendels geschahen unter der Voraussetzung, dass der Faden schwerlos sei und dass der Körper, welcher an seinem Ende aufgehängt ist, so klein angenommen werde, dass er als materieller Punkt betrachtet werden kann. Ein solches Pendel, das natürlich nur in Gedanken existirt, nennt man ein einfaches oder mathematisches Pendel. Unter seiner Länge ist natürlich die Länge des Fadens von seinem Aufhängepunkt bis zu dem materiellen Punkt am andern Ende zu verstehen.

Wenn ein Pendel von einem materiellen Faden gebildet wird, an dessen Ende ein schwerer Körper befestigt ist, so ist es kein einfaches Pendel mehr, wie fein auch der Faden oder wie klein auch der Körper sei. Die Pendel, welche zur Regulirung der Bewegung der Uhren dienen, und welche aus einer Stange von Holz oder Metall bestehen, die sich in einen linsenförmigen Körper endigt, sind noch weniger solche ideale Pendel, von denen wir eben gesprochen haben. Sie werden im Gegensatz zu den vorigen zusammengesetzte Pendel genannt.

Bei den Schwingungen eines zusammengesetzten Pendels schwingen alle Moleküle, aus denen es besteht, in der nämlichen Weise; die Schwingungsdauer jedes von ihnen ist dieselbe, wie die von allen andern. Wenn jene Moleküle einzeln an dem Aufhängepunkt mittelst biegsamer schwerloser Fäden aufgehängt wären, und wenn jedes derselben unabhängig von den andern schwingen könnte, so würden sie eben so viele einfache Pendel von verschiedener Länge bilden, ihre Schwingungen würden daher nicht die nämliche Dauer haben; diejenigen, welche näher an dem Aufhängepunkt wären, würden schneller, die andern langsamer schwingen. Man sieht daraus, dass, wenn alle Moleküle unter sich verbunden sind und dadurch das zusammengesetzte Pendel bilden, die Bewegung von einigen verzögert, von andern beschleunigt werden muss. Zwischen den erstern und letztern muss es gewisse in gleicher Entfernung vom Aufhängepunkt ge-

legene Moleküle geben, deren Bewegung weder verzögert, noch beschleunigt wird, und welche also auf die nämliche Art schwingen, als wenn sie allein vorhanden wären. Dasjenige dieser Moleküle, welches im Ruhezustande des Pendels vertikal unter dem Schwerpunkt (also auch vertikal unter der Achse) liegt, nennt man den Schwingungsmittelpunkt des Pendels und seine Entfernung vom Aufhängepunkt die reducirte Länge des zusammengesetzten Pendels; es ist dies offenbar die Länge desjenigen einfachen Pendels, welches dieselbe Schwingungsdauer hat wie das zusammengesetzte.

Die höhere Mechanik lehrt diese Länge durch Rechnung finden, welches auch die Gestalt des zusammengesetzten Pendels ist und aus welcher Materie auch seine verschiedenen Theile gebildet sind. Wir werden später (§. 148) bei der Betrachtung der drehenden Bewegung eines Körpers um eine Achse, welche Bewegung eigentlich so ein zusammengesetztes Pendel macht, Andeutungen geben, wie dies möglich ist. In dem Fall, wo das Pendel aus einer kleinen Bleikugel besteht, welche an einem feinen Faden aufgehängt ist, ist die Länge des einfachen Pendels, welches für dasselbe gesetzt werden kann, nur um eine unmerklich kleine Grösse von der Entfernung des Mittelpunktes der Kugel vom Aufhängepunkt verschieden. Diese Entfernung wird man also in obigen Entwicklungen für die Länge dieses Pendels nehmen können.

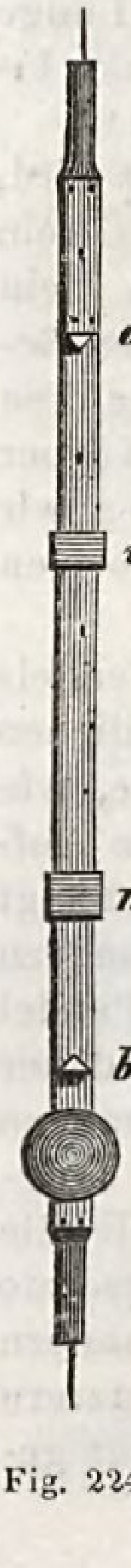


Fig. 224.

Hängt man dann ein solches Pendel neben ein zusammengesetztes von irgend welcher Gestalt auf, und verlängert oder verkürzt es so lange, bis es die nämliche Schwingungsdauer hat wie dieses, so ist seine Länge gleich der Länge jenes zusammengesetzten Pendels.

Es gibt noch einen anderen Weg, die Länge eines zusammengesetzten Pendels zu finden. Derselbe beruht auf der merkwürdigen Eigenschaft desselben, dass seine Schwingungsdauer die nämliche bleibt, wenn man seine Schwingungsachse mit einer andern vertauscht, welche gerade um die reducirte Länge des Pendels unter jener liegt. Bringt man daher an einem Pendel wie Fig. 224 ausser der Schneide a, um welche es für gewöhnlich schwingt, noch eine zweite b an, die zum Verschieben eingerichtet ist, und regulirt man letztere

so lange, bis das Pendel gleiche Schwingungsdauer zeigt, ob es um *a* oder *b* schwingt, so ist die Entfernung *ab* der beiden Schneiden die reducirte Länge des Pendels. Die verschiebbaren Gewichte *v* und *w* dienen zur Ausgleichung kleiner Abweichungen. Das ganze Pendel heisst Reversionspendel.

§. **138.** Um die Dauer der Schwingungen eines Pendels durch Versuche zu finden, zählt man am besten die Schwingungen, welche in einer bestimmten Zeit, in einer Minute, oder in einer Stunde, gemacht werden, und dividirt mit der so erhaltenen Zahl in die Anzahl der Secunden, welche in der gewählten Zeit enthalten sind. Wenn ausserdem das gebrauchte Pendel ein einfaches, oder wenigstens ein solches ist, das aus einer kleinen Bleikugel, an einem feinen Faden aufgehängt, besteht, oder wenn man die Länge des zusammengesetzten Pendels, das in Anwendung gebracht wurde, kennt, so kann man aus der Formel für die Schwingungsdauer (s. §. 136 am Schluss) den Werth von g, die Beschleunigung der Schwere, mit grosser Genauigkeit finden. Man darf nur diese Formel zu beiden Seiten ins Quadrat erheben und dann nach g auflösen, so erhält man

$$g = \frac{\pi^2 l}{t^2},$$

woraus also g gefunden werden kann, wenn man die Werthe von π, l und t kennt. Auf diese Weise hat man in der That den schon im §. 115 angegebenen Werth von g gleich $9,^{m}8088$ für Paris gefunden. An anderen Orten hat g einen etwas anderen Werth. Es ist aus den schon angegebenen Gründen kleiner unter dem Aequator und grösser unter den Polen. Folgende kleine Tabelle gibt in der dritten Columne die Werthe von g, wie sie an einigen in der Breite weit von einander gelegenen Orten der Erde beobachtet worden sind.

Tab. 9. Beschleunigung der Schwere und Länge des Secundenpendels.

Name des Ortes.	Geographische Breite.	Beschleunigung der Schwere g.	Länge des Secundenpendels.
St. Thomas	0° 24′ nördl.	$9,7819^{m}$	$0,9911^{m}$
Paris	48° 50′ „	9,8088	0,9938
London . .	51° 31′ „	9,8116	0,9941
Spitzbergen	79° 50′ „	9,8305	0,9960

Aus derselben Formel für die Schwingungsdauer folgt auch noch

$$l = \frac{g t^2}{\pi^2};$$

wenn man also den Werth von g kennt, so darf man nur die Schwingungsdauer irgend eines Pendels messen, um seine Länge zu finden. Es gibt folglich diese Formel ein Verfahren an die Hand, die Länge eines zusammengesetzten Pendels durch den Versuch zu

finden. — Ausserdem lässt dieselbe Formel die Länge eines Pendels finden, dessen Schwingungen eine gegebene Dauer haben. Wenn man z. B. die Länge des Secundenpendels, d. h. desjenigen Pendels finden will, das gerade eine Schwingung in jeder Secunde macht, so darf man in obiger Formel nur t gleich 1 setzen und erhält so:

$$l = \frac{g}{\pi^2}.$$

Man sieht daraus, dass die Länge des Secundenpendels und der Werth für die Beschleunigung der Schwere auf's innigste mit einander zusammenhängen. Es wird erstere um so kleiner, je kleiner letztere ist. Unter dem Aequator ist also die Länge des Secundenpendels am kleinsten, unter den Polen am grössten. In vorstehender Tabelle 9 ist in der letzten Columne die Länge des Secundenpendels für einige Orte der Erde angegeben.

§. 139. **Bewegung geworfener Körper.** — Wenn ein schwerer Körper horizontal hinausgeworfen wird, so setzt er seine Bewegung, wie gross auch seine Geschwindigkeit sein mag, niemals in horizontaler Linie fort; die Schwerkraft zieht ihn mehr und mehr von dieser Linie abwärts und zwingt ihn, eine krummlinige Bahn zu beschreiben. Die Zusammensetzung der beiden gleichzeitigen Bewegungen, welche der Körper hiebei hat, der ursprünglich ihm ertheilten und der ihm in jedem Augenblick von der Schwerkraft übertragenen, geschieht ganz nach dem Satze, welchen wir schon in §. 17 kennen gelernt haben. Um die Art und Weise, wie dabei die fortwährende Aenderung in der Richtung der Bewegung zu Stande kommt, leichter betrachten zu können, denken wir uns, dass die Schwere, anstatt ohne Unterbrechung stetig fortzuwirken, wie es in der Wirklichkeit der Fall ist, ihre Wirkung stossweise in aufeinander folgenden Zeitintervallen ausübe; wir werden z. B. voraussetzen, dass die ganze Dauer der Bewegung in viertel Secunden getheilt sei, und dass die Schwere plötzlich zu Anfang jedes dieser kleinen Zeitintervalle wirke, gleich darauf aber wieder aufhöre, um ihre Wirkung von Neuem zu Anfang des folgenden Zeitintervalls geltend zu machen u. s. w.

Zufolge dieser Annahme bleibt der nach der Linie AM (Fig. 225) horizontal hinausgeworfene Körper nur eine viertel Secunde lang auf dieser Linie. Am Ende dieser Zeit, wenn er

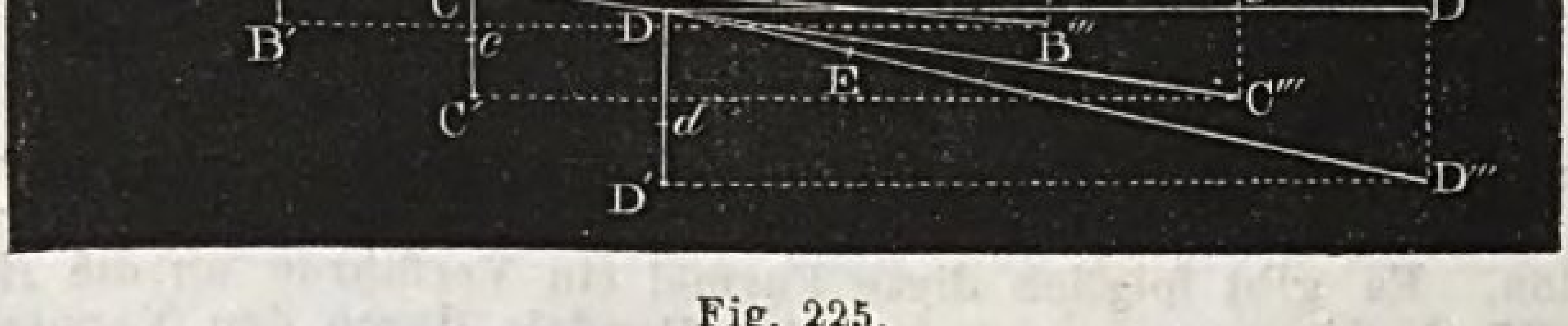


Fig. 225.

in B mit der Geschwindigkeit, welche er erhalten hat, und die durch BB'' vorgestellt sein mag, angekommen ist, erhalte er von der Schwerkraft einen Anstoss, welcher ihm eine vertikale Geschwindigkeit BB' ertheilt. Diese letztere Geschwindigkeit setzt sich mit der BB' zusammen, und es folgt daraus durch Construction des Parallelogramms die mittlere Geschwindigkeit BB'''. Mit dieser Geschwindigkeit und in der Richtung derselben bewegt sich nun der Körper die nächste viertel Secunde, und am Schlusse derselben, nachdem er die Länge BC, den vierten Theil von BB''', zurückgelegt hat, erhalte er von der Schwerkraft einen neuen Anstoss. Man denke sich nun, dass die Geschwindigkeit, welche der Körper in dem Punkte C besitzt, und die noch gleich BB''' ist, in zwei Componenten CC und C*c* zerlegt werde, welche bezüglich gleich und parallel den Componenten BB'' und BB' sind, so addirt sich die Geschwindigkeit, welche der Körper in Folge des neuen Anstosses durch die Schwerkraft im Punkte C erhält, zu der Componente C*c*, um eine doppelt so grosse vertikale Geschwindigkeit CC' zu bilden. Aus CC'' und CC' erhält man aber durch Construction des Parallelogramms die mittlere Geschwindigkeit CC'''.

Mit dieser Geschwindigkeit bewegt sich nun der Körper in der Richtung CC''' eine viertel Secunde lang gleichförmig fort und durchläuft dabei den Weg CD, den vierten Theil von CC'''. In D angekommen, kann man sich seine Geschwindigkeit CC''', die er in diesem Punkte noch besitzt, wieder in zwei Seitengeschwindigkeiten DD'' und D*d*, die bezüglich gleich und parallel CC'' und CC' sind, zerlegt denken. Die letztere derselben, D*d*, wird aber durch den nun erfolgenden neuen Anstoss der Schwerkraft wieder um ebensoviel wie vorhin vermehrt, so dass die daraus folgende gesammte Vertikalgeschwindigkeit DD' nun dreimal so gross als BB' ist. Diese Geschwindigkeit setzt sich mit der horizontalen Geschwindigkeit DD''' zusammen, so dass sich der Körper in der nächsten viertel Secunde in der Richtung DD''' um DE, den vierten Theil von DD''', fortbewegt, worauf die Schwerkraft wiederum die Grösse und Richtung seiner Geschwindigkeit ändert u. s. w. Man sieht also, dass nach unserer Annahme der Körper das Polygon ABCDE beschreibt.

Anstatt vorauszusetzen, dass die Schwere in Zwischenräumen von einer viertel Secunde auf den Körper wirkt, hätten wir auch annehmen können, dass sie nach jeder zehntel Secunde dem Körper einen Anstoss ertheilt. Wir hätten dann ein ganz ähnliches Resultat erhalten, nur würden die Seiten des Polygons, welches

der Körper durchläuft, kleiner und für die nämliche Gesammtdauer der Bewegung zahlreicher ausgefallen sein. Wenn man endlich die Verhältnisse nimmt, wie sie in Wirklichkeit stattfinden, so sieht man, dass die Schwere, indem sie unaufhörlich auf den Körper wirkt, denselben nicht mehr ein Polygon, sondern eine krumme Linie beschreiben macht. Noch mehr, wenn man die Geschwindigkeit des Körpers in dieser krummen Linie in jedem Augenblicke in eine horizontale und in eine vertikale Seitengeschwindigkeit zerlegt, so wird man finden, dass die horizontale Componente stets gleich ist der Geschwindigkeit, welche dem Körper ertheilt wurde, indem man ihn horizontal hinausschleuderte, während die vertikale Seitengeschwindigkeit keine andere, als die Geschwindigkeit ist, welche dem Körper von der Schwere mitgetheilt worden wäre, wenn er vom Anfang seiner Bewegung an unter dem alleinigen Einfluss dieser Kraft und ohne dass man ihm eine Geschwindigkeit mitgetheilt hätte, herabgefallen wäre.

Aus dem Letzteren folgt, dass man die Bewegung eines schweren Körpers, welcher von dem Punkt A (Fig. 226) aus mit einer gewissen Geschwindigkeit in der Richtung AM horizontal hinausgeschleudert wird, auch auf folgende Weise darstellen kann: Man denke sich, dass der Körper längs der Linie AN ohne anfängliche Geschwindigkeit vertikal herabfalle, und dass diese Linie parallel zu sich selbst mit einer Geschwindigkeit fortrücke, welche gleich derjenigen ist, welche dem Körper in der Richtung AM ertheilt wurde. In Folge dieser Geschwindigkeit nehme die Linie nach Verfluss von 1, 2, 3, 4 Secunden die Lagen BP, CQ, DR, ES ein. In der ersten Secunde falle der Körper die Höhe BG herab, so ist klar, dass er sich am Ende dieser Secunde in dem Punkte G befinden muss. In zwei Secunden durchfällt aber der Körper eine Höhe, welche viermal so gross als der Weg in der ersten Secunde ist; macht man daher CH gleich viermal BG, so muss sich der Körper am Ende der zweiten Secunde in H befinden. Ebenso ist der Weg, welchen der Körper während seines Herabfallens in 3 Secunden beschreibt, 9mal so gross als der in der ersten Secunde, und wenn man also DI gleich 9mal BG macht, so ist I der Ort des Körpers nach 3 Secunden u. s. w. Man kann

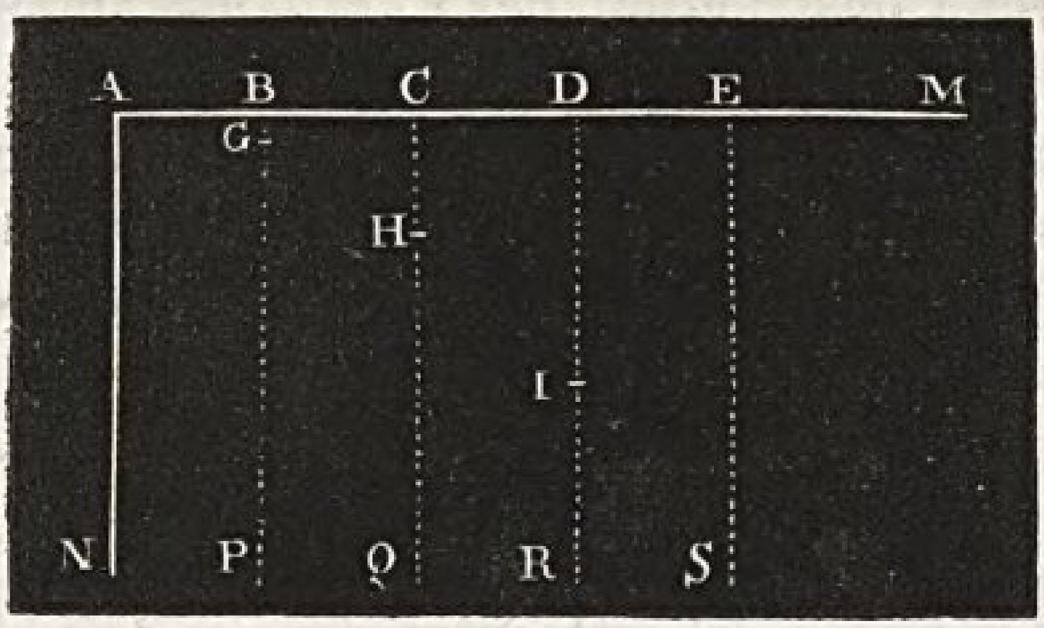


Fig. 226.

ebenso leicht auch beliebige Zwischenlagen des Körpers z. B. nach Verlauf von $^1/_2$, $1^1/_2$, $2^1/_2$ Secunden finden, sodass man im Stande sein wird, die krumme Linie, welche er beschreibt, zu ziehen. Diese krumme Linie nennt man in der Geometrie eine Parabel; sie hat, wie man sieht, die Eigenschaft, dass, wenn G, H, I Punkte derselben sind, deren Abstände von der Linie AN sich wie die Zahlen 1, 2, 3 verhalten, die Abstände dieser Punkte von der Linie AM den Quadraten dieser Zahlen, 1, 4, 9, proportional sind. Die Form dieser krummen Linie hängt offenbar von der Grösse der Geschwindigkeit ab, mit welcher der Körper horizontal hinausgeworfen wird. Die Fig. 227—229 stellen die Parabeln vor, welche von Körpern beschrieben werden, deren Geschwindigkeiten, mit welchen sie horizontal hinausgeworfen werden, sich wie die Zahlen 1, 2, 3 verhalten.

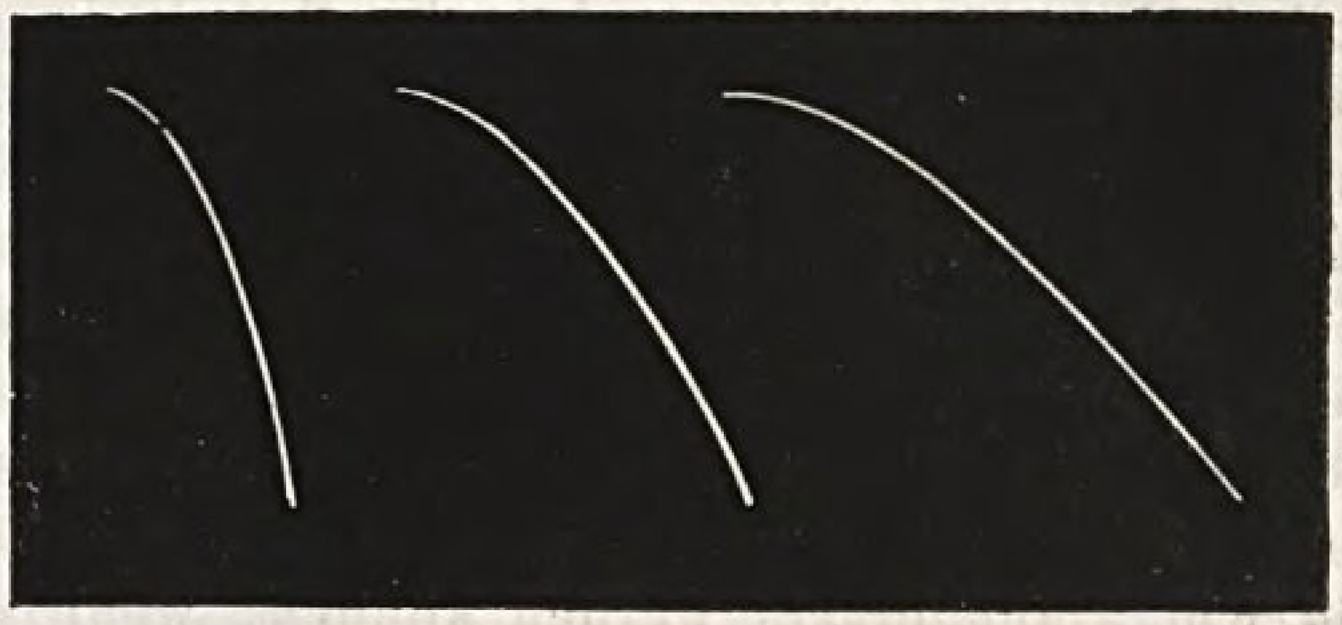


Fig. 227. Fig. 228. Fig. 229.

Dass ein Körper, welcher horizontal hinausgeworfen und darauf der alleinigen Wirkung der Schwerkraft überlassen wird, eine Parabel beschreibt, kann auf folgende Weise auch durch den Versuch bewiesen werden. Man bedient sich zu diesem Zwecke des in Fig. 230 abgebildeten Apparates. Dieser Apparat besteht aus einer Tafel von Holz, auf welche man mehrere Parabeln verzeichnet hat, die von dem nämlichen Punkt A ausgehen und die Wege darstellen, welche ein Körper durchläuft, der von diesem Punkt A aus mit verschiedenen Geschwindigkeiten horizontal hinausgeworfen wird. Neben dem Punkte A befindet sich ein Stück Holz, welches einen

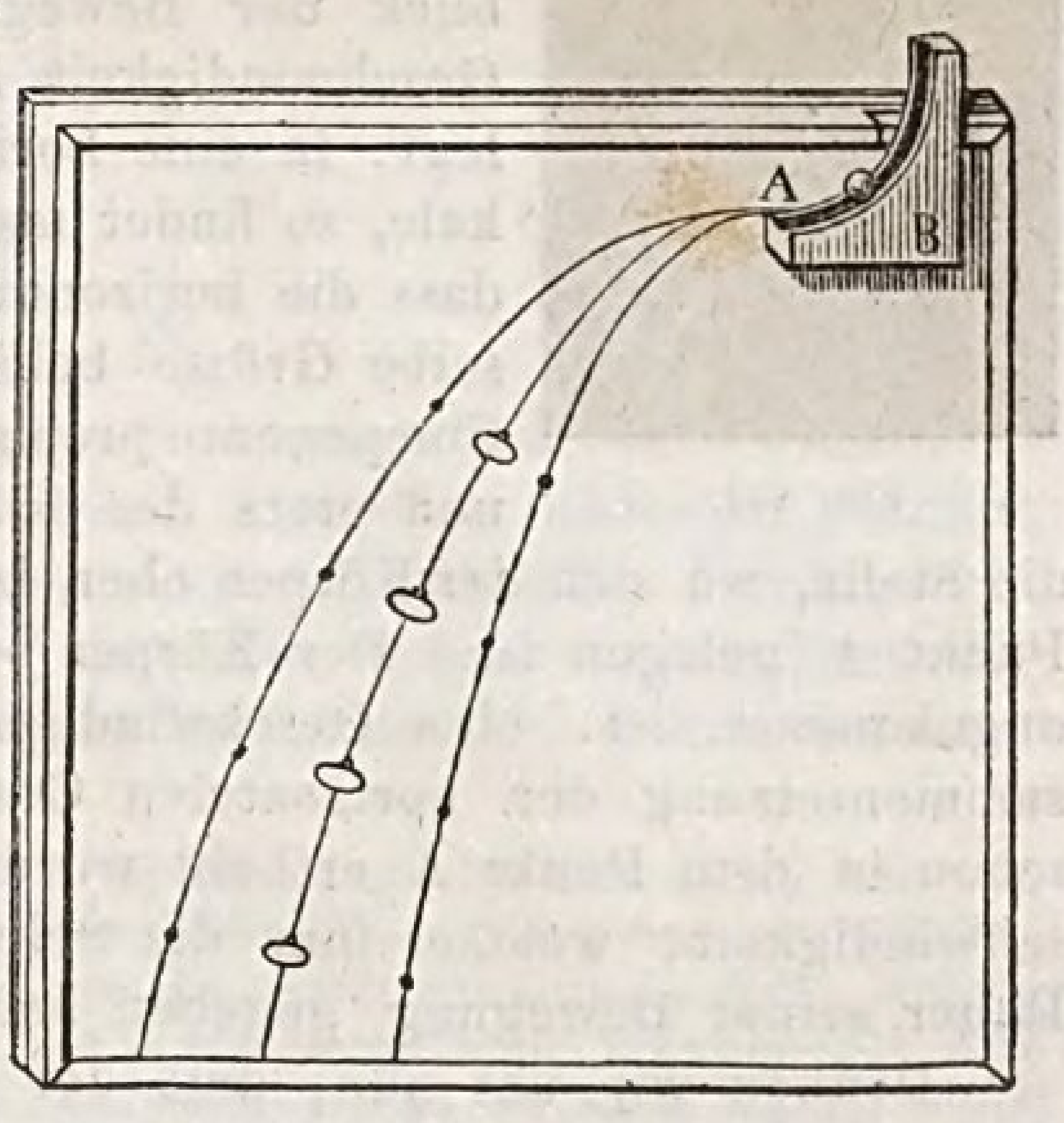


Fig. 230.

Vorsprung bildet und dessen gekrümmte Seite der Länge nach eine Rinne zeigt. Diese Rinne ist so angebracht, dass eine Kugel, welche unter dem Einfluss der Schwere in ihr herabrollt, an ihrem untersten Punkte mit horizontaler Geschwindigkeit ankommt, und dass sich an dieser Stelle der Mittelpunkt der Kugel in gleicher Höhe mit dem Punkt A befindet. Wenn man nun die Kugel von verschiedenen Punkten der Rinne aus herabrollen lässt, so gewinnt sie, in dem Punkte A ankommend, verschiedene horizontale Geschwindigkeiten, und nach einigem Probiren gelangt man leicht dazu, ihr eine solche Geschwindigkeit zu geben, dass sie eine von den auf der Tafel verzeichneten Parabeln durchläuft. Um sich vollständig zu versichern, dass die Kugel genau einer dieser Parabeln folgt, befestigt man an mehreren Punkten dieser Curve mittelst Schrauben Ringe, durch welche die Kugel leicht hindurchgehen kann. Wenn man diese dann von einer passenden Höhe die Rinne herabrollen lässt, so sieht man sie durch alle diese Ringe hindurchgehen. Die Fig. 230 zeigt solche Ringe, wie sie auf der mittleren der dort gezeichneten Parabeln angebracht sind. An den beiden andern sieht man die Löcher, in welchen die Ringe angebracht werden können, wenn man den Versuch mit andern Anfangsgeschwindigkeiten wiederholen will.

§. 140. Es sei AB (Fig. 231) die Parabel, welche ein schwerer Körper beschreibt, der im Sinne des Pfeiles f von dem Punkte A aus horizontal hinausgeworfen wird. Wenn man in jedem Augenblick der Bewegung dieses Körpers seine Geschwindigkeit in zwei Componenten zerlegt, in eine horizontale und in eine vertikale, so findet man, wie wir bereits wissen, dass die horizontale Componente immer dieselbe Grösse behält, während die vertikale Componente proportional mit der Zeit wächst und stets der Höhe entspricht, um welche die Stelle, wo sich der Körper eben befindet, vertikal unter dem Punkt A gelegen ist. Der Körper besitzt also, wenn er in B angekommen ist, eine Geschwindigkeit, welche aus der Zusammensetzung der horizontalen Geschwindigkeit, welche ihm schon in dem Punkt A ertheilt wurde, und der vertikalen Geschwindigkeit, welche ihm die Schwere während der ganzen Dauer seiner Bewegung gegeben hat, hervorgeht.

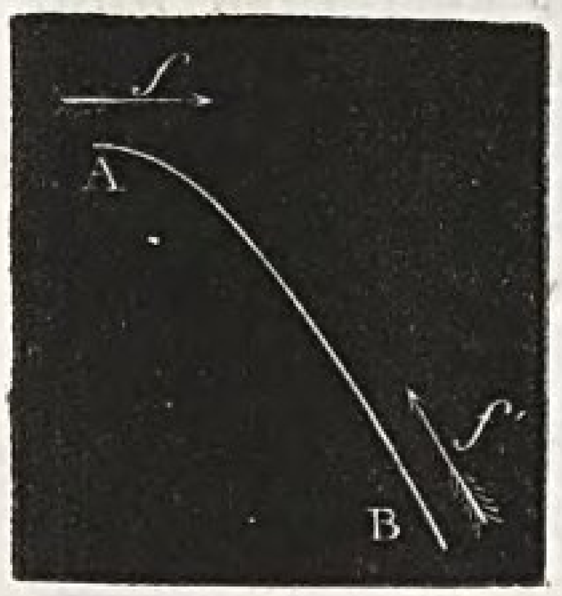


Fig. 231.

Denken wir uns nun, dass der Körper von dem Punkte B aus mit der Geschwindigkeit, welche er gewonnen hatte, als er

in diesem Punkt ankam, in entgegengesetzter Richtung, wie es der Pfeil *f*, anzeigt, schief aufwärts geworfen werde. Dann vermindert die Schwere nach und nach die vertikale Componente dieser Geschwindigkeit ganz auf dieselbe Art, wie sie dieselbe vorhin vergrösserte, als der Körper im Sinne des Pfeiles *f* geworfen wurde; die horizontale Componente dagegen erleidet keine Veränderung, und der Körper erhält folglich nach und nach in umgekehrter Ordnung Geschwindigkeiten, welche gleich, aber entgegengesetzt denjenigen sind, welche er vorhin erhalten hat. Es folgt daraus nothwendig, dass der Körper denselben Weg, welchen er im Herabfallen zurückgelegt hat, wieder emporsteigen, d. h. dass er dieselbe Parabel AB wieder beschreiben wird, jetzt aber in der Richtung von B nach A; in A angekommen, wird er offenbar dieselbe horizontale Geschwindigkeit wieder besitzen, mit welcher man ihn vorhin von diesem Punkt aus hinausgeschleudert hatte.

Wir sind nun im Stande, die Bewegung zu verfolgen, welche ein schwerer Körper annimmt, wenn er in schiefer Richtung AB (Fig. 232) hinausgeworfen wird. Der Körper wird zunächst im Ansteigen den Parabelbogen AC beschreiben; in dem Punkt C angekommen, wo seine Bewegung horizontal gerichtet ist, befindet er sich unter denselben Umständen, als wenn er von diesem Punkt aus in der Richtung CD horizontal hinausgeschleudert würde; er wird folglich einen neuen Parabelbogen CF beschreiben. Die beiden Bögen AC und CF müssen, wie aus dem Vorhergehenden hervorgeht, gegen die Vertikallinie durch den höchsten Punkt C vollständig symmetrisch liegen; der Weg ACF, welcher von dem Körper durchlaufen wird, ist nichts weiter als ein Theil der vollständigen, nach beiden Seiten ins Unendliche sich erstreckenden Parabel MCN.

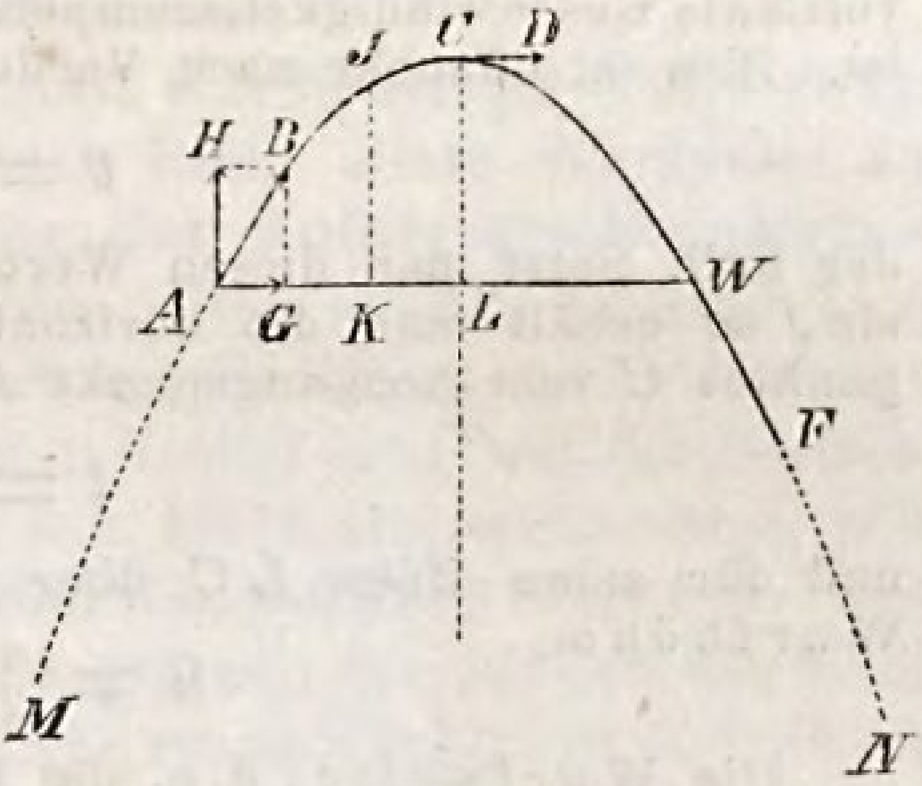


Fig. 232.

Nach dem Vorhergehenden ist es leicht, die Bewegung des von *A* (Fig. 232) aus schief aufwärts geworfenen Körpers durch Rechnung zu verfolgen. Zerlegt man die Geschwindigkeit *AB*, welche dem Körper ertheilt wurde, in eine horizontale Componente *AG* oder *c* und in eine vertikale *AH* oder *c'*, so ist nach irgend einer Zeit, nach *A* Secunden z. B., in welcher der Körper von *A* nach *I*

gekommen ist, sein horizontaler Abstand von A, nämlich AK oder x ebenso gross als wenn er sich mit der Geschwindigkeit c horizontal und gleichförmig von A nach K bewegt hätte, also

$$x = ct, \quad (1)$$

und sein vertikaler Abstand KI oder y von A erhält dieselbe Grösse, als wenn er, mit der Geschwindigkeit c' vertikal aufwärts geworfen, die dadurch bedingte gleichförmig verzögerte Bewegung von K nach I gemacht hätte; es wird also

$$y = c't - \tfrac{1}{2} g t^2, \quad (2)$$

wenn g wie immer die Beschleunigung der Schwere bedeutet. Die horizontale Geschwindigkeitscomponente des Körpers in I ist constant c, die vertikale

$$v = c' - gt. \quad (3)$$

Aus der Formel (1) folgt

$$t = \frac{x}{c}$$

und setzt man dies in Formel (2) ein, so folgt:

$$y = \frac{c'}{c} x - \frac{1}{2} \frac{g}{c^2} x^2, \quad (4)$$

mittelst welcher Formel man ohne Rücksicht auf die Zeit für jeden Werth von x oder AK das zugehörige y oder KI finden kann.

Der Körper hat den höchsten Punkt (C) erreicht, wenn seine vertikale Geschwindigkeitscomponente v [Formel (3)] Null geworden ist. Dies ist offenbar nach Verfluss der Zeit

$$t = \frac{c'}{g}$$

der Fall. Setzt man diesen Werth für t in die Formeln (1) und (2) ein, so erhält man die horizontale Entfernung AL des Scheitelpunktes C vom Ausgangspunkt A

$$l = \frac{cc'}{g} \quad (5)$$

und für seine Höhe LC über dem Ausgangspunkt, für die sog. Wurfhöhe

$$h = \frac{1}{2} \frac{c'^2}{g} \quad (6).$$

Die Wurfweite, d. h. die Entfernung AW des Punktes W, wo der Körper in die durch den Ausgangspunkt A gelegte Horizontalebene wieder zurückfällt, von jenem Ausgangspunkt, ist doppelt so gross als AL, also

$$w = \frac{2cc'}{g} \quad (7).$$

§. 141. Die Form der Parabel, welche ein schief hinausgeworfener Körper beschreibt, hängt von der Grösse sowohl, als auch von der Richtung der Geschwindigkeit ab, welche ihm ertheilt wurde. Wenn man blos die Richtung der Geschwindigkeit, aber nicht ihre Grösse verändert, wenn man also z. B. voraussetzt, dass der Körper immer mit derselben Stärke nach und nach in den Richtungen AB, AC, AD, AE (Fig. 233) hinausgeworfen

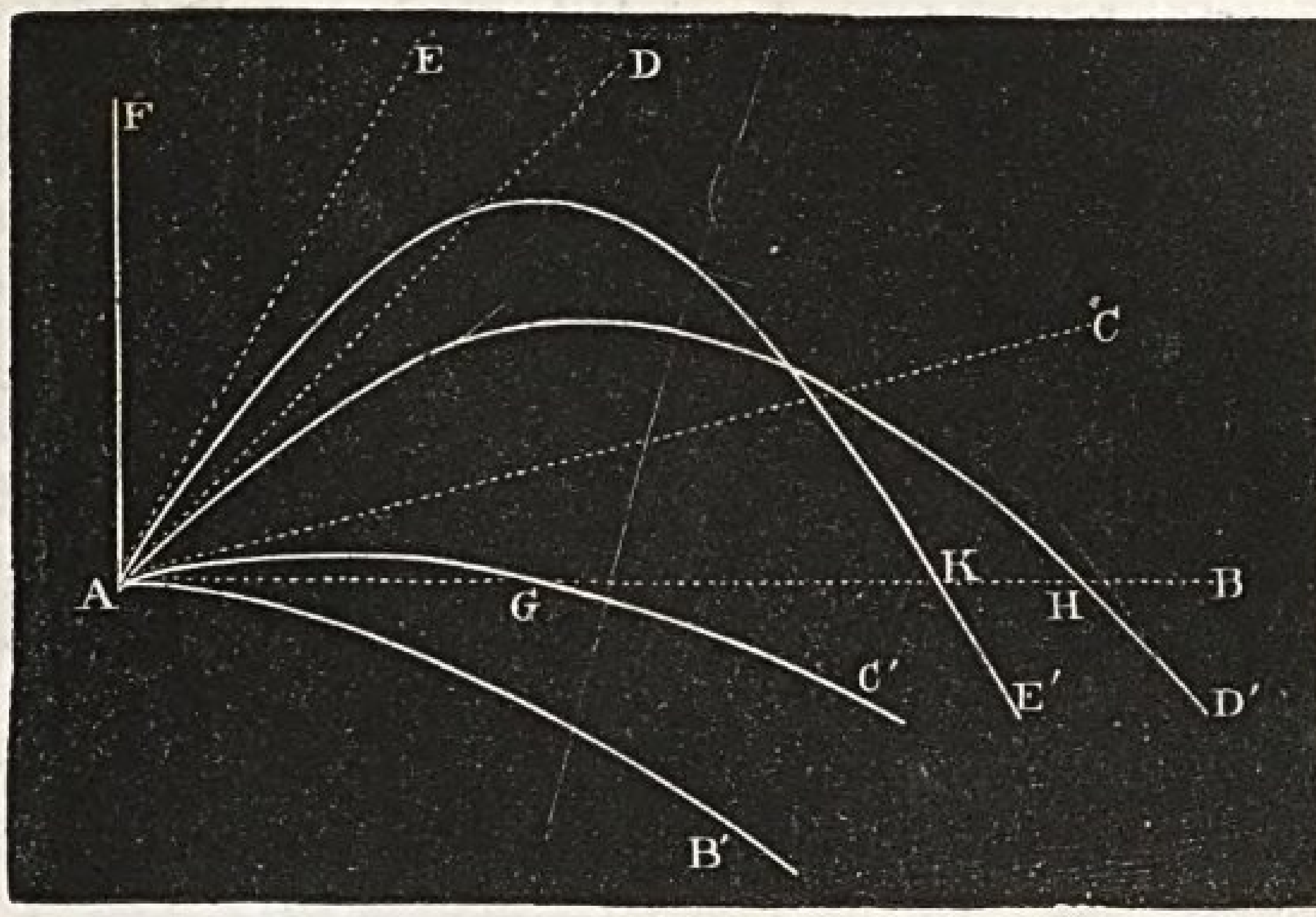


Fig. 233.

wird, so sieht man, wie derselbe verschiedene Parabeln AB′, AC′, AD′, AE′ beschreibt. Die erste dieser Parabeln senkt sich alsbald unter die horizontale Linie AB, während die andern, nachdem sie sich über diese Linie erhoben hatten, derselben wieder in den Punkten G, H, K begegnen, die sehr verschiedene Entfernungen von dem Punkte A haben.

Jede der Entfernungen AG, AH, AK heisst die **Wurfweite** des Körpers in dem entsprechenden Fall. Diese Wurfweite ändert sich also mit der Richtung der Anfangsgeschwindigkeit, welche dem Körper ertheilt wurde. Eine genaue Untersuchung dieser Frage zeigt, dass, wenn anfangs die Richtung der Anfangsgeschwindigkeit nur einen kleinen Winkel BAC mit der Horizontalen bildet, die Wurfweite AG nur klein ist; wenn dann jene Richtung sich mehr und mehr über den Horizont erhebt, so wird die Wurfweite immer grösser und grösser, bis endlich die Richtung der Anfangsgeschwindigkeit, AD, einen Winkel von 45° mit der Horizontalen bildet; wenn von da an jene Richtung sich der Vertikalen AF noch mehr nähert, so vermindert sich die Wurfweite wieder, und sie wird ganz Null, wenn die Anfangsgeschwindigkeit vertikal aufwärts nach AF gerichtet ist. Es muss also der Körper unter einem Winkel von 45° mit der Horizontalen hinausgeworfen werden, damit, bei gleich grosser Anfangsgeschwindigkeit, die Wurfweite ihren grössten Werth erreicht. Der grösste Werth AH dieser Wurfweite wird ausserdem gerade doppelt so gross als die Höhe AF gefunden, bis zu welcher sich der Körper erheben würde, wenn er mit derselben Geschwindigkeit vertikal von unten nach oben geworfen würde.

Diese Resultate gehen sehr einfach aus den am Ende des vorigen Paragraphen für die Wurfbewegung entwickelten Formeln hervor. Wenn, wie oben vorausgesetzt, die Geschwindigkeit AB (Fig. 232), mit welcher der Körper hinausgeworfen wird, dieselbe bleibt und nur ihre Richtung sich ändert, so ändern sich mit letzterer die beiden Seiten des Rechtecks $AHBG$, indem die eine grösser und die andere zugleich kleiner wird, während die Diagonale desselben constant bleibt. Dabei wird, wie man sich sehr leicht überzeugt, das Product aus den beiden Seiten des Rechtecks, cc', also nach der Formel (7) des vorigen Paragraphen auch die Wurfweite, am grössten, wenn diese Seiten selbst einander gleich werden, der Winkel GAB also den Werth 45° erhält. Diese grösste Wurfweite selbst wird, wenn man die beiden nun gleichen Geschwindigkeitscomponenten mit c bezeichnet,

$$w_0 = \frac{2c^2}{g}; \quad (1)$$

die dazu gehörige Wurfhöhe h_0 wird nach Formel (6) des vorigen Paragraphen

$$h_0 = \frac{1}{2}\frac{c^2}{g}, \quad (2)$$

also w_0 viermal so gross als h_0. Bezeichnet endlich noch γ die Geschwindigkeit AB (Fig. 232) selbst für den Fall, dass der Winkel GAB gleich 45° ist, so ist offenbar

$$\gamma^2 = 2c^2.$$

Ersetzt man hiernach c durch γ in obigen Formeln, so wird

$$w_0 = \frac{\gamma^2}{g}, \quad (3)$$

$$h_0 = \frac{1}{4}\frac{\gamma^2}{g}; \quad (4)$$

und vergleicht man dies mit der letzten Formel des §. 117, so sieht man, dass die grösste Wurfweite w_0 doppelt und die dazu gehörige Wurfhöhe h_0 halb so gross als die Höhe ist, auf welche sich der Körper erhoben hätte, wenn er mit der Geschwindigkeit $AB = \gamma$ vertikal aufwärts geworfen worden wäre.

Durch den Widerstand, welchen die Luft allen Körpern, die sich in ihr bewegen, darbietet, erleiden die Resultate, die wir im Vorhergehenden für die geworfenen Körper erhalten haben, nicht unbeträchtliche Abänderungen, wenn, wie es immer der Fall sein wird, die Bewegung in der Luft vor sich geht. Vor Allem ist die Curve, welche ein schief hinausgeworfener Körper beschreibt, keine eigentliche Parabel mehr; der höchste Punkt derselben ist etwas mehr herabgedrückt und der zweite Ast mehr nach einwärts gebogen, als es bei der Parabel sein würde. Dadurch wird natürlich auch die Wurfweite vermindert, und das Maximum der Wurfweite findet nicht mehr bei einem Winkel von 45°, sondern bei Geschossen ungefähr bei einem Winkel von 36° statt, welchen die Anfangsgeschwindigkeit mit der Horizontalen bildet.

§. 142. Wenn eine Kugel, die aus dem Laufe eines Gewehres oder aus dem Rohr einer Kanone abgeschossen wird, ein bestimmtes Ziel treffen soll, so darf sie nicht in der geraden Linie, welche nach jenem Ziele gezogen werden kann, abgefeuert werden. Denn wir wissen aus dem Vorhergehenden, dass sich ein Körper, welcher hinausgeworfen wird, stets mehr oder weniger unter die Richtung seiner Anfangsgeschwindigkeit herabsenkt; wenn also die Kugel ein bestimmtes Ziel treffen soll, so muss man ihr eine Richtung geben, die sich über die gerade Linie, die nach diesem Ziel gezogen wird, erhebt, und zwar gerade um so viel, dass die Parabel, welche die Kugel in Folge der Einwirkung der Schwerkraft beschreibt, durch das zu treffende Ziel hindurchgeht.

Bei dem Schiessen aus Gewehren richtet man den Lauf mittelst zweier Absehepunkte, dem sog. Korn am vorderen und dem Diopter am hinteren Ende desselben, indem man das Gewehr so hält, dass die Visirlinie, welche durch diese beiden Punkte A, B (Fig. 234) geht, nach dem Ziele gerichtet ist, welches man treffen will. Wenn diese Visirlinie parallel zur Achse des Rohres ist

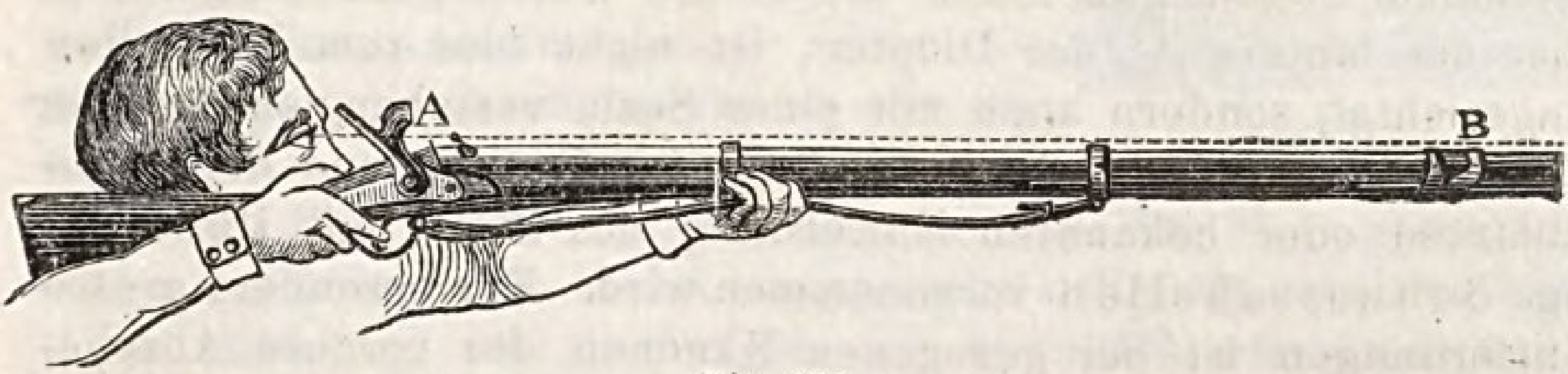


Fig. 234.

und das Geschoss genau dieser Achse folgt, so muss es nothwendig etwas unterhalb des Zieles ankommen; jedoch ist seine Geschwindigkeit im Vergleich zu der Distanz, welche es gewöhnlich zu durchlaufen hat, so gross, dass die Senkung, welche es in Folge des Einflusses der Schwere erhält, von sehr geringem Belange ist.

Bei den vollkommeneren Gewehren dagegen, wie bei den Jagdbüchsen, den Miniébüchsen und Zündnadelgewehren des Militärs u. s. f., welche das Geschoss sehr weit tragen, hat man den Absehepunkt A (Fig. 235), welcher zunächst dem Auge ist, beweglich gelassen, so dass man ihn beliebig heben oder senken kann, je nachdem das zu treffende Ziel mehr oder weniger entfernt ist. Wenn auf diese Weise der bewegliche Diopter die richtige Stellung erhalten hat, so muss, während die Visirlinie durch ihn über das Korn B hinweg gerade nach dem Ziele geht, der Lauf eine solche schiefe Richtung gegen dieselbe haben, dass

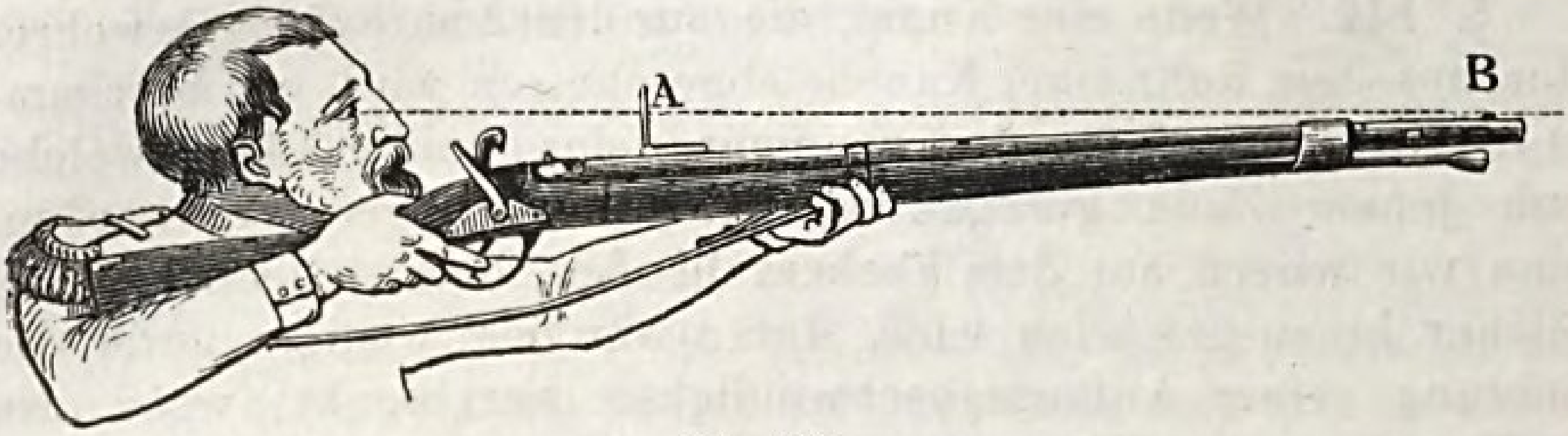


Fig. 235.

die Kugel, indem sie ihre Parabel beschreibt, in dem Punkt ankommt, den man treffen will.

Das Geschoss selbst erhält bei diesen Gewehren eine solche Gestalt, dass es die Luft möglichst leicht durchdringt; es wird also nicht kugelförmig gemacht, sondern nach vorn zugespitzt (Spitzkugeln). Am besten eignet sich aus diesen Gründen die ganz einfache glatte Gestalt eines Zuckerhutes im Kleinen nachgeahmt.

Am meisten kommt die Elevation des Rohres bei den Geschützen, namentlich bei den gezogenen, in Betracht. Die Rohre derselben tragen gleichfalls die beiden Absehepunkte A und B aber der hintere A, das Diopter, ist nicht blos zum Verstellen eingerichtet, sondern auch mit einer Scala versehen, an welcher die Einstellung je nach der Grösse der Ladung und der abgeschätzten oder bekannten Entfernung des Zieles mit Hülfe der sog. Schusstabellen vorgenommen wird. Für besonders grosse Entfernungen ist bei gezogenen Kanonen der vordere Absehepunkt B, anstatt am Ende des Rohres, ohngefähr in der Mitte desselben über der Querachse, um welche es sich drehen lässt und zwar seitwärts auf dem Schildzapfen angebracht. Genau um ebensoviel seitwärts muss dann auch das Diopter stehen.

Uebrigens hat man bei den gezogenen Geschützen gefunden, dass die Geschosse auch seitwärts von der Vertikalebene, die man sich durch die Längenachse des Rohres gelegt denkt, abweichen. Man nennt diess die Derivation der Geschosse, und sie kommt offenbar von der mehr schraubenförmigen Bahn her, welche diese in der Luft beschreiben. Wegen dieser Abweichung muss das Diopter A um Grössen, die man gleichfalls aus den Schusstabellen entnimmt, zur Seite gerückt werden.

§. 143. **Bewegung der Himmelskörper.** — Die Astronomie lehrt uns, dass die Erde sowie die übrigen Planeten im Raume frei schwebende Körper sind, welche sich in geschlossenen Curven, die nahezu die Gestalt von Kreisen haben, um die Sonne bewegen. Es ist leicht, uns über die Art und Weise,

wie diese krummlinige Bewegung zu Stande kommt, Rechenschaft zu geben.

Wenn die Erde in irgend einem Augenblick der Wirkung aller äussern Kräfte entzogen würde, so würde sie sich in Folge der Geschwindigkeit, welche sie in diesem Augenblick besitzt, gleichförmig und in gerader Linie weiter bewegen. Wenn sie also eine krumme Linie beschreibt, so muss sie nothwendig der Einwirkung einer Kraft unterliegen, welche sie in jedem Augenblick von der geraden Richtung ablenkt, die sie in Folge ihrer Trägheit zu beschreiben sucht. *Newton* hat bewiesen, dass diese Kraft stets nach der Sonne gerichtet ist, wie es durch den Pfeil in Fig. 236 angedeutet wird, in welcher S die Sonne und T die Erde vorstellt; dass also diese Kraft als eine Anziehung der Erde durch die Sonne anzusehen ist. *Newton* hat ferner gezeigt, dass die Grösse dieser Anziehung oder Gravitation dem Quadrate der Entfernung der Erde von der Sonne umgekehrt proportional ist. Unter der Wirkung dieser Anziehungskraft sucht die Erde gegen die Sonne zu fallen, wie ein Stein unter der Wirkung der Schwere zur Erde fällt, und es würde dies auch in der That geschehen, wenn die Erde nicht eine Anfangsgeschwindigkeit erhalten hätte deren Richtung, von derjenigen der Linie TS verschieden, die, der Tangente TA an die Bahn ist. In Folge dieser Geschwindigkeit befindet sie sich unter denselben Umständen, wie ein schwerer Körper, der in horizontaler oder beinahe horizontaler Richtung hinausgeworfen wird, und wenn sie nicht wie dieser eine Parabel beschreibt, so kommt dies daher, dass in dem Maasse, wie sie ihren Platz verändert, auch die Richtung der Kraft, die immer durch den Mittelpunkt der Sonne geht, verändert wird, während wir bei einem Körper, der an der Oberfläche der Erde horizontal hinausgeworfen wird, wegen der im Verhältniss zu den Dimensionen der Erde geringen Ausdehnung seines Weges, den er beschreibt, annehmen konnten, dass die Richtungen der Schwerkraft an den verschiedenen Stellen, wo er sich befindet, sämmtlich parallel unter einander sind.

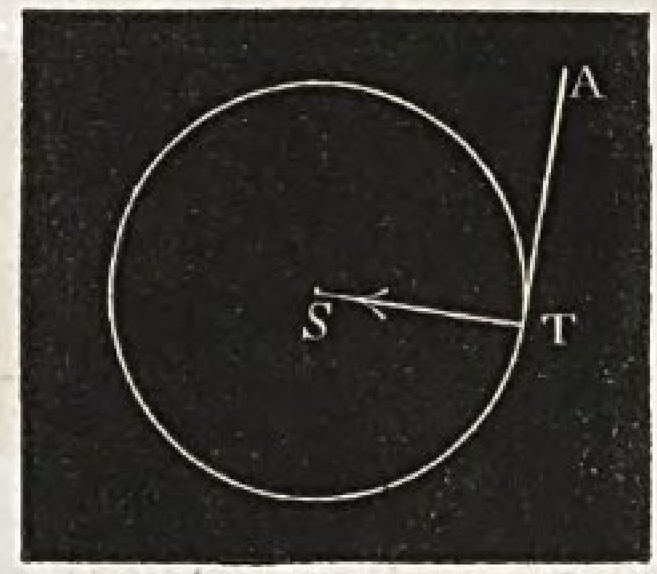


Fig. 236.

Wenn eine Kanonenkugel mit immer grösserer und grösserer Geschwindigkeit horizontal hinausgeschossen wird, so fällt sie in immer weiter und weiter entfernten Punkten auf die Erde nieder, und die Parabel, welche sie beschreibt, hat eine immer

weniger stark ausgesprochene Krümmung. Sie würde immer wieder auf die Erde zurückkehren, wie gross auch die ihr ertheilte Geschwindigkeit wäre, wenn die Oberfläche der Erde eine Ebene wäre (Fig. 237).

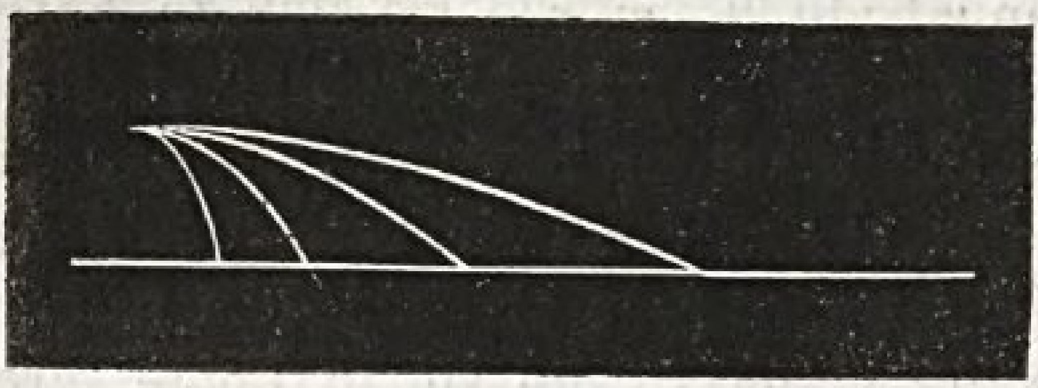


Fig. 237.

Aber die Oberfläche der Erde, die nahezu die Gestalt einer Kugel hat, ist gekrümmt; die Kugel wird also nur so lange auf dieselbe zurückfallen, als die Parabeln AB oder AC oder AD (Fig. 238), welche sie in Folge der Schwerkraft beschreibt, in dem Punkte A mehr gekrümmt sind als die Oberfläche der Erde. Von dem Augenblick an, wo die Wurfgeschwindigkeit gross genug ist, sodass die Krümmung der Parabel in dem Punkte A jene der Erde nicht mehr übertrifft, fällt die Kanonenkugel nicht mehr auf dieselbe zurück.

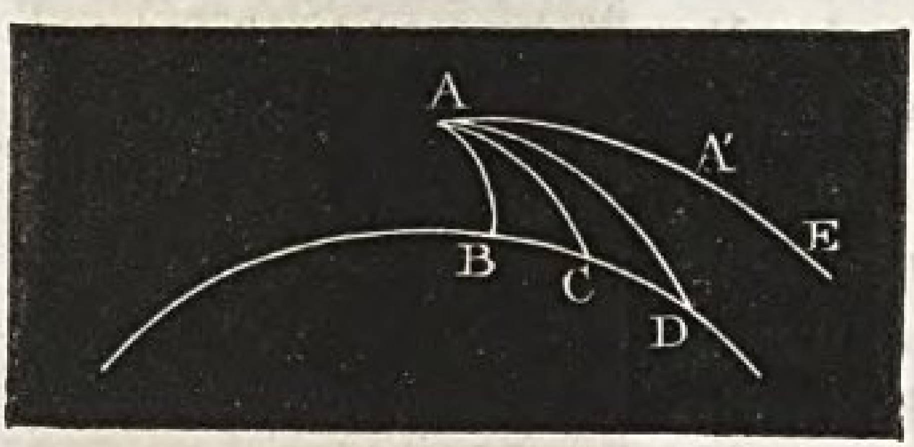


Fig. 238.

In diesem letzteren Falle entfernt sich aber die Kugel so weit von ihrem Ausgangspunkt, dass es nicht mehr erlaubt ist, die Richtungen der Schwerkraft in allen Punkten, wo sich jene befindet, als parallel vorauszusetzen, sondern es muss angenommen werden, dass diese Kraft stets nach dem Mittelpunkt der Erde gerichtet ist. Dann ist aber auch die Curve, welche die Kugel beschreibt, keine Parabel mehr. Denken wir uns z. B., dass sie den Bogen AA′ beschrieben hätte, ohne sich der Erde zu nähern, so befindet sie sich in dem Punkte A′ unter den nämlichen Umständen, wie zu Anfang ihrer Bewegung, und setzt daher ihre Bewegung um die Erde ohne Unterlass fort, ohne derselben jemals zu begegnen, vorausgesetzt, dass keine äusseren Hindernisse, wie der Widerstand der Luft, ihre Geschwindigkeit vermindern. Freilich müsste der Kanonenkugel selbst unter dieser letzteren Voraussetzung eine ungeheure Geschwindigkeit von wenigstens 8000^{m} in der Secunde ertheilt werden, damit sie nicht mehr auf die Erde zurückfallen und folglich eine Art von Satelliten der Erde, wie der Mond ein solcher ist, bilden würde,

§. 144. Wir wollen nun die Art und Weise näher betrachten, wie die Bewegung der Planeten um die Sonne in Folge der Anziehungskraft, welche diese gegen sie ausübt, zu Stande kommt; es wird uns diese Bewegung ein Beispiel für den

Fall geben, wo eine der Grösse und Richtung nach veränderliche Kraft auf einen Körper wirkt, der ursprünglich eine bestimmte Geschwindigkeit nach einer gewissen Richtung hin erhalten hat. Wir wollen dabei einen etwas anderen Weg einschlagen als wir es bei der Wurfbewegung gethan haben, obwohl wir auch ganz so wie dort verfahren könnten. Die in Wirklichkeit ununterbrochen fortwirkende Anziehungskraft der Sonne denken wir uns wieder stossweise zu Anfang kleiner, gleich grosser Zeitintervalle wirkend, in welche wir uns die ganze Bewegung getheilt denken. Der Planet komme in dem Punkte P (Fig. 239) mit einer bestimmten Geschwindigkeit an in Folge deren er sich in einem solchen Zeitintervall von P nach a bewegen würde. Er erhält aber durch die Anziehungskraft der Sonne zu Anfang dieses Zeitintervalls eine bestimmte Geschwindigkeit, in Folge deren er sich, wie wir annehmen wollen, während dieses kleinen Zeitabschnitts

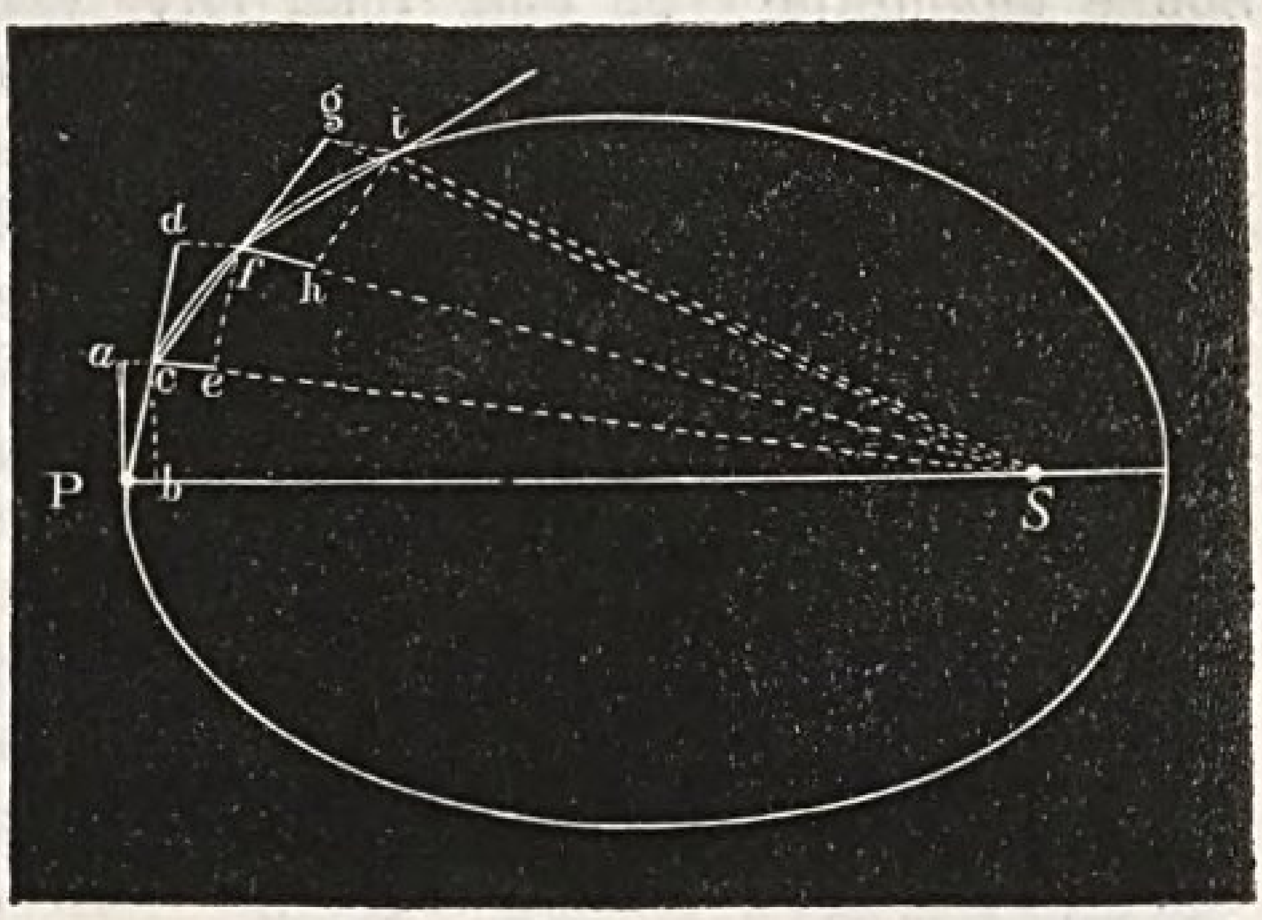


Fig. 239.

von P nach b in gerader Richtung gegen die Sonne bewegen würde. In Wirklichkeit beschreibt er also die Diagonale Pc des Parallelogramms Pacb, das über jenen beiden Wegen construirt werden kann. Wenn er sich nun selber überlassen bliebe, so würde er sich in dem nächsten kleinen Zeitabschnitt in gleicher Richtung und mit derselben Geschwindigkeit fortbewegen und dadurch also von c nach d gelangen, vorausgesetzt, dass cd gleich Pc genommen wird. Aber zu Anfang dieses Zeitintervalls ertheilt ihm die Sonne in der Richtung cS eine neue Geschwindigkeit, in Folge deren er in diesem Zeitabschnitt den Weg ce beschreiben würde, der sich zu dem Weg Pb umgekehrt wie die Quadrate der Abstände des Planeten von der Sonne in den Punkten P und c verhalten muss. Im zweiten Zeitintervall beschreibt also der Planet die Diagonale cf des Parallelogramms $cdfe$, und wenn dann weiter keine Kraft auf ihn wirken würde, so würde er sich in derselben Richtung und mit derselben Geschwindigkeit weiter bewegen und folglich im dritten Zeitintervall den Weg fg gleich cf

beschreiben. Aber zu Anfang dieses Intervalls erhält er von der Sonne einen neuen Anstoss, in Folge dessen er in diesem Zeitabschnitt, wenn er sich allein überlassen würde, den Weg fh zurücklegen würde, dessen Grösse dem umgekehrten Verhältniss des Quadrats der Entfernung des Planeten von der Sonne entsprechen muss. Der Planet beschreibt also wieder die Diagonale des Parallelogramms $fgih$ u. s. w. f. Wir erhalten auf diese Weise das Polygon $Pcfi$..... als die Bahn des Planeten. Wenn wir die Zeitintervalle kleiner genommen hätten, so würden die Seiten dieses Polygons kleiner und zahlreicher geworden sein, und wenn wir zur Wirklichkeit zurückkehren, wo die Anziehungskraft der Sonne ununterbrochen und stetig fortwirkt, so erhalten wir eine stetig gekrümmte Linie als Bahn des Planeten.

Die so eben betrachtete Art der Bewegung um einen Punkt herum, durch welchen in jedem Augenblick die Richtung der Kraft hindurch geht, heisst *Centralbewegung* und jener Punkt ihr *Mittelpunkt* (Centrum). Die Kraft, welche den Körper stets nach dem Mittelpunkt hinzieht, heisst *Centripetalkraft* oder *Ziehkraft*; die Verbindungslinie des beweglichen Körpers mit dem Mittelpunkt *Radius vector* oder *Fahrstrahl*.

Wir können durch eine einfache Betrachtung eine sehr wichtige Eigenschaft dieser Centralbewegung herausstellen. Da die Dreiecke cfS und fgS (Fig. 239) gleiche Grundlinien haben, die in derselben Geraden gelegen sind, und da ausserdem ihre Spitzen in einem Punkt S zusammenfallen, so sind sie an Flächeninhalt einander gleich. Da ferner die Dreiecke gif und giS auf derselben Grundlinie stehen und die Verbindungslinie ihrer Spitzen, Sf, parallel zu dieser Grundlinie ist, so haben sie ebenfalls gleich grosse Flächen. Wenn man folglich das Dreieck giS zum Dreieck fgS hinzufügt und darauf von beiden das Dreieck gif wegnimmt, so bleibt ein Dreieck fiS übrig, das noch ebenso gross als das Dreieck fgS und folglich auch ebenso gross als das Dreieck cfS ist. Es sind also die Dreiecke fiS, cfS und ebenso auch PcS, welche der Radius vector in gleichen Zeitabschnitten beschreibt, sämmmtlich an Fläche einander gleich, und wenn man sich jene Zeitabschnitte immer kleiner und kleiner, dagegen dann aber mehrere zusammengenommen denkt, so folgt daraus der Satz:

Die Bahnen, welche die Planeten um die Sonne beschreiben, haben die Eigenschaft, dass der Radius vector in gleichen Zeiten gleiche Flächenräume beschreibt.

Dieser Satz bildet das zweite der berühmten drei *Kepler*'schen Gesetze. Aus ihm geht unmittelbar hervor, dass die Geschwindigkeit eines Planeten um so kleiner ist, je weiter er von der Sonne entfernt ist und um so grösser, je näher er der Sonne kommt. Denn damit die Flächenräume der von den Radien vectoren in gleichen Zeiten beschriebenen dreieckartigen Räume dieselben seien, muss deren Oeffnung am Centrum und daher der Theil der Bahn, den die Schenkel abschneiden, um so grösser werden, je näher der Planet an der Sonne ist.

Wir haben bei der Entwicklung des obigen Satzes nur berücksichtigt, dass die Kraft, durch welche der Planet in seiner Bahn erhalten wird, stets nach einem und demselben Mittelpunkt, der Sonne, gerichtet ist. Wenn man ausserdem noch in Betracht zieht, was uns jedoch hier zu weit führen würde, dass die Stärke der Anziehung des Planeten durch die Sonne dem Quadrat der Entfernung beider umgekehrt proportional ist, so erhält man das erste *Kepler*'sche Gesetz:

Die Bahnen der Planeten sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkt sich die Sonne befindet.

Die Vergleichung zweier solcher Centralbewegungen, die in verschiedenen Entfernungen von ihrem Mittelpunkt ausgeführt werden, führt zu dem dritten *Kepler*'schen Gesetz:

Die Quadrate der Umlaufszeiten zweier Planeten verhalten sich wie die Würfel der grossen Achsen ihrer Bahnen.

Der Entwicklungsgang, den unsere Kenntniss von der Bewegung der Planeten in der Geschichte wirklich genommen hat, ist der umgekehrte von dem, welchen wir im Vorhergehenden gewählt haben. *Kepler* hat seine drei Gesetze aus den Beobachtungen der Planeten, namentlich des Mars, unmittelbar abgeleitet, und diese Gesetze waren es, welche *Newton* auf den Satz, dass die Planeten durch Kräfte, welche stets durch den Mittelpunkt der Sonne gehen und deren Grösse dem Quadrat der Entfernung des Planeten von der Sonne umgekehrt proportional ist, sein berühmtes Gravitationsgesetz, geleitet haben.

Unter gewissen Bedingungen kann der Körper bei seiner Centralbewegung um einen Mittelpunkt, wie wir sie in dem vorigen Paragraphen betrachtet haben, immer gleiche Entfernung von diesem Mittelpunkt behalten, seine Bahn kann also eine Kreislinie werden. In diesem Fall müssen in Fig. 239 die Radien vectoren SP, Sc, Sf, Si sämmtlich einander gleich werden, und daraus folgt leicht, dass die in den einzelnen Zeitabschnitten

beschriebenen Wege P*c*, *cf*, *fi* etc. gleich gross sein müssen. Die Bewegung des Körpers in der Kreislinie ist also gleichförmig.

Dies gilt natürlich auch dann noch, wenn die Centripetalkraft durch den Widerstand eines Körpers gebildet wird, welcher sich zwischen dem drehenden Körper und dem Centrum der Bewegung befindet, wie z. B. bei einem, an einer Schnur befestigten Stein, der im Kreise herumgeschleudert wird, und namentlich auch bei den einzelnen Molekülen eines um eine feste Achse rotirenden Körpers. Ein solcher Körper also wird, nachdem er einen Anstoss erhalten hat, seine Bewegung ohne Unterlass mit der nämlichen Winkelgeschwindigkeit fortsetzen, vorausgesetzt, dass keine Ursache auf ihn wirkt, die seine Bewegung abzuändern sucht. Ein Schleifstein würde, einmal in Bewegung gesetzt, fortwährend eine gleichförmige Rotationsbewegung behalten, wenn die äusseren Einwirkungen, wie die Reibung seiner Achse in ihren Lagern, der Luftwiderstand, sowie der Widerstand, der durch die Körper hervorgebracht wird, welche an ihm geschliffen werden, nicht vorhanden wären.

2. Drehende Bewegung um eine feste Achse.

§. 145. **Mittelpunkt des Stosses.** — Welches auch die Kräfte sein mögen, welche auf einen um eine feste Achse drehbaren Körper wirken, sie lassen sich nach §. 58 Nr. 3 stets in mindestens zwei vereinigen, von denen die eine ihren Angriffspunkt in der Achse selbst hat und also keinen Antheil an der Drehung des Körpers nimmt, sondern lediglich einen Druck gegen die Achse ausübt. Die andere Kraft kann stets in eine, zur Achse parallele Componente und in eine zweite zerlegt werden, welche senkrecht auf jener steht, also in einer zur Achse senkrechten Ebene liegt. Davon hat wieder nur die zweite Einfluss auf die Drehung. R (Fig. 240) sei diese zweite Kraft an dem um die Achse *a* rotirenden Körper M. Dieselbe lässt sich wieder in zwei Componenten Q und P zerlegen, von denen die eine, Q, in ihrer Verlängerung durch die Achse geht, während die andere senkrecht darauf steht. Die erstere kann zur Bewegung des Körpers offenbar weiter nichts

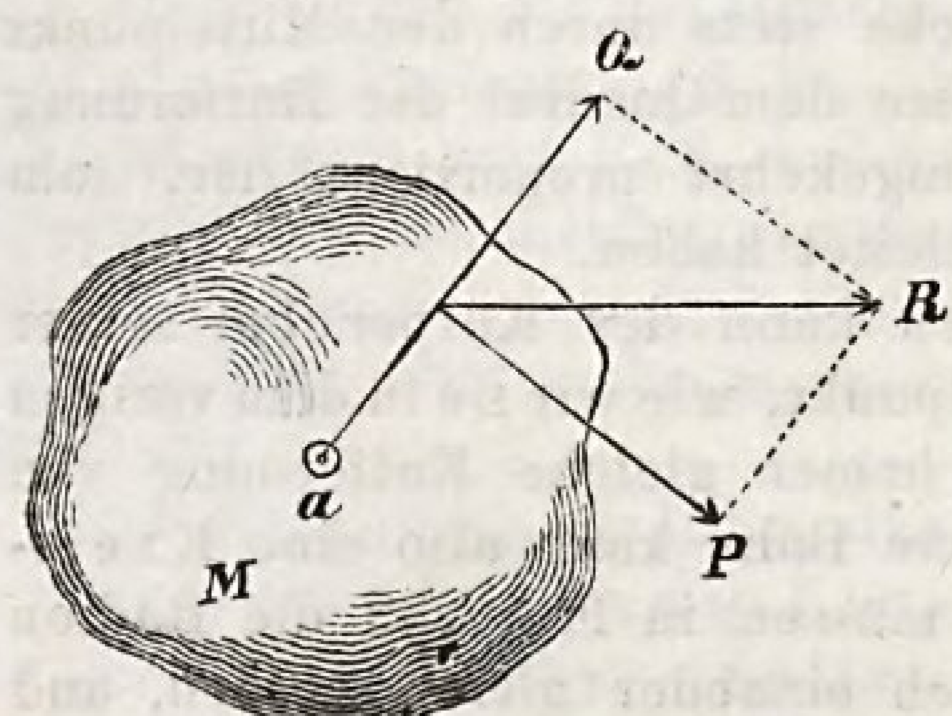


Fig. 240.

beitragen, aber die zweite P ist es, welche den Körper dreht, und zwar ohne irgend welche directe Einwirkung auf seine Achse.

Die Wirkung der Kraft P besteht darin, dass sie die Bewegungen sämmtlicher Moleküle des Körpers beschleunigt und damit natürlich die Umdrehungsgeschwindigkeit des ganzen Körpers. Nun stehen die Geschwindigkeiten jener Moleküle in einem engen Zusammenhang: sie sind ihren Entfernungen von der Achse proportional, sodass man sie erhält, wenn man die Winkelgeschwindigkeit des Körpers, d. h. die Geschwindigkeit eines in der Einheit der Entfernung von der Drehungsachse gelegenen Moleküls, mit der Entfernung des betreffenden Molekül multiplicirt (vgl. §. 16). In demselben Verhältniss stehen offenbar die Beschleunigungen, welche die verschiedenen Moleküle des Körpers durch jene Kraft P erhalten. Nennen wir Winkelbeschleunigung diejenige, welche der Winkelgeschwindigkeit, d. h. einem Moleküle in der Entfernung 1 von der Drehungsachse zukommt, so ist die Beschleunigung jedes anderen Moleküls gleich dieser multiplicirt mit seiner Entfernung von der Achse.

Umgekehrt, wenn wir sehen, dass sich ein um eine Achse drehbarer Körper nicht gleichförmig dreht, sondern dass er in einem bestimmten Augenblick eine bestimmte Winkelbeschleunigung besitzt, so schliessen wir daraus auf eine oder mehrere Kräfte, die an ihm thätig sind und diese Veränderung der Bewegung hervorrufen. Welcher Art dann auch diese Kräfte sein mögen, wir können sie ersetzen durch eine freilich sehr grosse Anzahl anderer, von denen jede an einem Molekül thätig und gleich dem Produkt aus der Masse dieses Moleküls in seine Beschleunigung, oder auch gleich dem Produkt aus der Masse des Körpertheilchens in die, mit der Entfernung desselben von der Achse multiplicirte Winkelbeschleunigung des Körpers ist. Die Richtung jeder solchen Kraft ist die der Bewegung des Moleküls, also die im Sinne dieser Bewegung an den Kreis, welchen dasselbe beschreibt, gezogene Tangente. Alle diese Kräfte müssen sich in eine Resultante vereinigen lassen, entsprechend der Kraft P (Fig. 240), welche sie ersetzen. Der Angriffspunkt dieser Resultante, der übrigens in ihrer Richtung verlegt werden kann, wohin man will, heisst der Mittelpunkt des Stosses des Körpers.

Es lässt sich zuvörderst leicht zeigen, dass die Lage dieses merkwürdigen Punktes nicht von den Kräften abhängt, welche auf den rotirenden Körper einwirken, sondern lediglich von der Gestalt des Körpers und der Vertheilung der Massen in dem-

selben. Denn wie sich auch die Kräfte, die an dem Körper wirken, ändern mögen, die Wirkung dieser Aenderung besteht allein in einer Aenderung der Winkelbeschleunigung des Körpers; proportional mit dieser ändern sich aber die Beschleunigungen aller Moleküle und daher auch die Grösse sämmtlicher an ihnen wirkenden Kräfte. Und die so veränderten Kräfte geben offenbar eine mit der vorigen in demselben Verhältniss stehende Resultante in dem nämlichen Angriffspunkt. Man darf daher von dem Mittelpunkt des Stosses eines rotirenden Körpers sprechen, ohne Rücksichtnahme auf die an ihm thätigen Kräfte.

Um zu erläutern, woher der Mittelpunkt des Stosses eines rotirenden Körpers seinen Namen hat, denken wir uns eine, um die Achse a (Fig. 241) in der Richtung des Pfeiles f in Drehung befindliche Stange ab. Soll diese ihre Bewegung eine allmähliche oder plötzliche Verzögerung erfahren, so müssen die Geschwindigkeiten sämmtlicher Moleküle verringert werden, und wir können uns dies durch Kräfte hervorgebracht denken, die, der Bewegung gerade entgegenwirkend, an den einzelnen Molekülen thätig und gleich dem Produkt aus ihrer Masse in ihre Beschleunigung (eigentlich hier Verzögerung) sind. Diese sämmtlichen Kräfte vereinigen sich in einer auf ab senkrechten Kraft P, die ihren Angriffspunkt im Mittelpunkt m des Stosses hat. Die Kraft P kann man sich aber dadurch erzeugt denken, dass der Stab bei m gegen ein festes Hinderniss stösst und sie vertheilt sich dann auf die einzelnen Moleküle in der Weise, dass auf jedes derselben der oben besprochene Antheil trifft, sodass die Gesammtwirkung dieselbe ist, als wenn jedes Molekül für sich von jenem auf ihn treffenden Theil zurückgehalten würde. Die Drehungsachse erleidet dabei offenbar keinerlei Einwirkung.

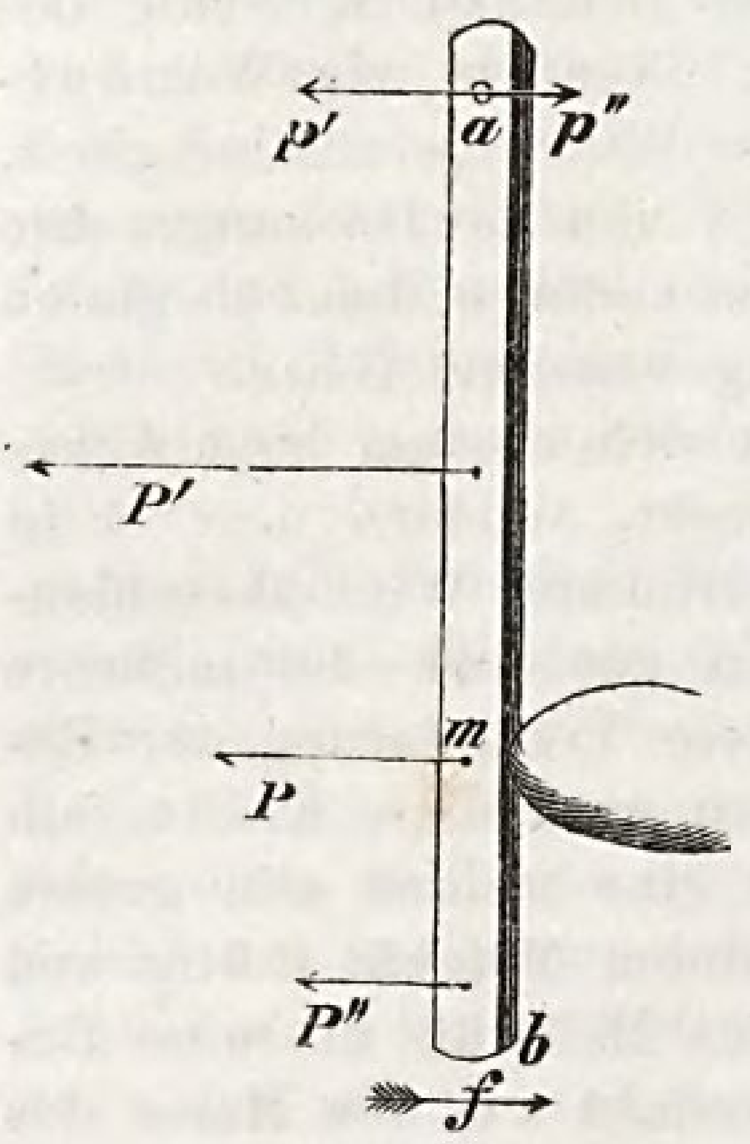


Fig. 241.

Die nämliche Wirkung wie die Kraft P kann irgend eine, näher an oder entfernter von der Achse gelegene Kraft P' oder P'' auch hervorbringen, wenn nur ihr statisches Moment in Bezug auf die Drehungsachse dasselbe ist wie das der Kraft P (vgl. §. 69), oder wenn sie sich nur in zwei parallele Componenten zerlegen lässt, von denen die eine P selbst ist, während die an-

dere p' oder p'' in der Achse angreift. Aber man sieht, dass jetzt eben neben dem, dass sich die eine Componente wie vorhin auf die Moleküle vertheilt und die gewünschte Wirkung hervorbringt, auch noch Einwirkungen p' und p'' auf die Achse stattfinden.

Man kann die eben erläuterte Eigenschaft des Mittelpunkts des Stosses an einem einfachen Experiment nachweisen. Hält man eine Schiene zwischen den Fingern, sodass sie sich hier wie um eine Achse drehen kann, und schlägt man damit gegen die Kante des Tisches, anfangs nahe, dann in immer grösserer Entfernung von jener Achse, so spürt man bei jedem Schlag an den Fingern anfangs einen Ruck (Prellung) nach rückwärts, später nach vorwärts. Dazwischen liegt ein Punkt, eben der Mittelpunkt des Stosses, wo die Finger keine Einwirkung verspüren.

Es ist klar, dass die Lehre vom Mittelpunkt des Stosses bei schweren Hämmern, die sich um eine Achse drehen, bei Schwanz-, Stirn- und Aufwerfhämmern, eine grosse Rolle spielt. Das Aufschlagen dieser Hämmer muss offenbar im Mittelpunkt des Stosses, oder besser gesagt, in der Richtung der Linie stattfinden, welche, durch den Mittelpunkt des Stosses gehend, auf der senkrechten Verbindungslinie desselben mit der Achse senkrecht steht, wenn nicht die Drehungsachse Erschütterungen erfahren soll, die eine baldige Zerstörung derselben nach sich ziehen.

§. 146. **Trägheitsmoment.** — Für die Einwirkung der Kraft P (Fig. 240), auf welche sämmtliche an dem rotirenden Körper thätigen Kräfte bezüglich ihrer Drehwirkung zurückgeführt werden können, auf die Drehung selbst, ist es, wie oben bereits gesagt, völlig gleichgiltig, wo sie angreift, wenn nur ihr statisches Moment, d. h. das Produkt aus ihr in ihre Entfernung von der Drehungsachse dasselbe bleibt, oder wenn sie nur stets ihrer Entfernung von der Drehungsachse umgekehrt proportional genommen wird. Wenn es sich nun aber darum handelt, die Wirkung selbst, welche die Kraft hervorbringt, d. h. eben die Winkelbeschleunigung, welche sie dem Körper ertheilt, kennen zu lernen, so sollte man sie nach Obigem freilich in den Mittelpunkt des Stosses verlegen und von hier aus auf die einzelnen Moleküle vertheilen, also auch auf die in der Einheit der Entfernung von der Achse gelegenen, welche eben die Winkelbeschleunigung selbst besitzen.

Einfacher käme man offenbar zu dem eben gesteckten Ziele, wenn es gelänge, die Masse des ganzen rotirenden Körpers in

einem Punkt zu vereinigen, ohne seine Bewegung dadurch zu beeinträchtigen. Denn dann könnte man den Angriffspunkt der Kraft P ebenfalls an diesen Punkt verlegen und hätte nun wieder den einfachen Fall, wo die Kraft an einem Punkt wirkt, in dem die ganze Masse des Körpers concentrirt ist. In der That ist dieser Weg möglich, wie folgende Entwicklung zeigt.

An einer gewichtlosen Stange (Fig. 242), die sich um eine Achse, welche durch den Punkt C hindurchgeht, drehen kann, befinde sich ein Massenmolekül A. Die ganze Verbindung werde durch eine gewisse Kraft in Rotation versetzt und erhalte dabei eine bestimmte Beschleunigung. Es fragt sich, durch welche Masse, in dem Punkt B vereinigt, das Massenmolekül A ersetzt werden kann, damit die Stange unter dem Einfluss der nämlichen Kraft die nämliche Bewegung erhält? Wir wollen der Einfachheit halber annehmen, dass der Punct A doppelt so weit von der Drehungsachse entfernt sei als der Punkt B. Man kann sich offenbar in dem Punkt A eine Kraft wirkend denken, welche, senkrecht auf AC gerichtet, der bewegenden Kraft das Gleichgewicht hält. Diese Kraft, in gleicher Grösse aber entgegengesetzt genommen, ist dann offenbar im Stande, die ursprünglich gegebene bewegende Kraft zu ersetzen und hat die Eigenschaft, dass sie das Massenmolekül A im nächsten Augenblick in ihrer eigenen Richtung zu bewegen sucht. Denken wir uns nun das Molekül in A durch eines in dem Punkt B ersetzt, so wird diese Masse, da die Bewegung der ganzen Verbindung die nämliche bleiben soll, in jedem Augenblick nur die Hälfte der Geschwindigkeit des Punktes A haben, und es wird daher dieser Masse von der bewegenden Kraft nur eine halb so grosse Beschleunigung als dem Molekül in dem Punkt A ertheilt werden dürfen. Wenn wir uns ferner, ebenso wie vorhin, die bewegende Kraft durch eine andere ersetzt denken, die in B angreift und senkrecht auf BC wirkt, sodass sie die Masse in B im nächsten Augenblick in ihrer eigenen Richtung zu bewegen sucht, so sieht man leicht, dass diese Kraft doppelt so gross als die vorhin in A sein muss. Die doppelt so grosse Kraft in B darf also nur die halbe Beschleunigung hervorbringen, woraus folgt, dass die nach B versetzte Masse viermal so gross als die des Moleküls A sein muss. Hätten wir in gleicher Weise die Entfernung der Masse B von der Drehungsachse drei- oder viermal so klein als die des Moleküls A genommen, so würden wir diese Masse offenbar 9- oder 16mal so gross, als die dieses letzteren

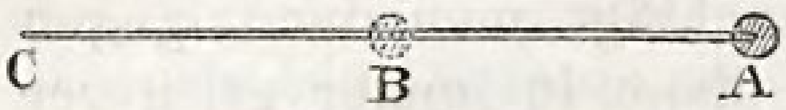


Fig. 242.

Moleküls gefunden haben. Allgemein ergibt sich also: Massen, welche, in verschiedenen Entfernungen von der Drehungsachse gelegen, sich gegenseitig sollen ersetzen können, ohne dass die Rotationsbewegung geändert wird, müssen sich umgekehrt wie die Quadrate ihrer Entfernungen von der Drehungsachse verhalten, oder was dasselbe ist, die Producte aus diesen Massen in die Quadrate ihrer Entfernungen von der Drehungsachse müssen einander gleich sein.

Man nennt das Product aus der Masse eines Moleküls in das Quadrat seiner Entfernung von der Drehungsachse das Trägheitsmoment dieses Moleküls. Der obige Satz kann daher auch folgendermaassen ausgesprochen werden: Man kann ein Massenmolekül, das sich in bestimmter Entfernung von der Drehungsachse befindet, durch ein anderes in beliebiger Entfernung von derselben ersetzen, ohne dass die Bewegung der ganzen Verbindung, von der jenes Molekül einen Theil ausmacht, geändert wird, wenn das Trägheitsmoment des zweiten Moleküls in Bezug auf die Drehungsachse gleich dem des ersten ist.

Es war in dem Vorhergehenden offenbar gleichgiltig, ob der Punkt B in der geraden Linie AC oder irgend wo anders in derselben Entfernung von der Drehungsachse gelegen ist, wenn er nur mit der Stange AC stets in fester Verbindung bleibt. Dies berücksichtigt ist es nun leicht, sogleich auf unsere allgemeine Aufgabe überzugehen, wo es sich darum handelt, die Masse eines ganzen Körpers, der sich um eine feste Achse dreht, durch eine andere, in einem gegebenen Punkt concentrirt gedachte, zu ersetzen, ohne dass dadurch die Bewegung des Körpers eine Aenderung erleidet. Zur Lösung dieser Aufgabe darf man offenbar nur jedes Massenmolekül des Körpers auf dieselbe Art wie vorhin in den gegebenen Punkt verlegen, also so, dass sein Trägheitsmoment gleich gross bleibt. Auf diese Weise erhält man offenbar in dem gegebenen Punkt eine Masse, deren Trägheitsmoment gleich der Summe der Trägheitsmomente der einzelnen Moleküle des Körpers ist. Nun nennt man die Summe der Trägheitsmomente der einzelnen Moleküle eines Körpers in Bezug auf eine feste Achse das Trägheitsmoment des Körpers in Bezug auf jene feste Achse und kann daher folgenden Satz aussprechen: Man kann sich die Masse eines um eine feste Achse drehenden Körpers, ohne dass seine Bewegung eine Aenderung

erleidet, durch eine andere ersetzt denken, die in einem gegebenen Punkt concentrirt ist, wenn das Trägheitsmoment dieser letzteren in Bezug auf jene Achse, gleich dem Trägheitsmoment des Körpers in Bezug auf dieselbe Achse ist.

Das Trägheitsmoment eines um eine gewisse feste Achse rotirenden Körpers ist nach Obigem blos von der Gestalt des Körpers und von der Vertheilung seiner Masse abhängig; es kann daher für jeden Körper, der eine bestimmte Drehungsachse hat, gleich von vorneherein bestimmt werden. Wir können zwar diese Bestimmung hier nicht durchführen, da sie in Folge der unzähligen Menge der Moleküle, aus denen jeder Körper besteht, mehr Kenntnisse in der Mathematik verlangt, als hier vorausgesetzt werden sollen; aber aus dem Vorhergehenden wird doch so viel klar, dass das Trägheitsmoment eines Körpers in Bezug auf eine feste Achse nicht blos von seiner Masse überhaupt, sondern auch von der Anordnung derselben um die Drehungsachse abhängt. Je weiter diese Masse oder wenigstens ein Theil derselben von der Drehungsachse entfernt ist, desto grösser ist das Trägheitsmoment des Körpers.

Wenn man überlegt, dass das Trägheitsmoment eines rotirenden Körpers nichts anders als die Masse ist, welche statt der Masse des ganzen Körpers in der Einheit der Entfernung von der Drehungsachse angebracht werden kann, ohne die Bewegung zu ändern, so ist es nun leicht, die Wirkung beliebiger Kräfte auf einen solchen Körper zu beurtheilen, oder umgekehrt, diejenigen Kräfte zu finden, welche nothwendig sind, um eine bestimmte Bewegung, d. h. eine bestimmte Winkelbeschleunigung hervorzubringen. Diese Kräfte müssen, um von letzterem Fall zuerst zu sprechen, insofern sie Einfluss auf die Drehung besitzen, eine Resultante haben, welche in der Einheit der Entfernung von der Drehungsachse angreift und in einer Richtung wirkt, die auf der senkrechten Verbindungslinie ihres Angriffpunktes mit der Drehungsachse senkrecht steht. Die Grösse derselben muss gleich sein dem Product aus dem Trägheitsmoment des Körpers in seine Winkelbeschleunigung. Natürlich kann dann diese Kraft vermittest des Momentensatzes in jede andere Entfernung von der Achse verlegt werden.

Umgekehrt können, wie schon am Eingang des §. 145 gesagt, irgend welche auf einen rotirenden Körper wirkende Kräfte ihrer Drehwirkung nach in eine einzige P (Fig. 240) zusammengefasst werden. Diese Kraft kann man sodann mittelst

des Momentensatzes mit ihrem Angriffspunkt in die Einheit der Entfernung von der Achse verlegen und die Winkelbeschleunigung, welche sie erzeugt, erhält man dann offenbar, wenn man sie durch das Trägheitsmoment dividirt.

In gleicher Weise ergibt sich nun, dass man unter der Bewegungsgrösse eines Körpers, der sich um eine feste Achse dreht, das Product aus dem Trägheitsmoment desselben in Bezug auf jene Achse in seine Winkelgeschwindigkeit zu verstehen hat, und ebenso ist offenbar die lebendige Potenz eines solchen Körpers gleich dem halben Product aus seinem Trägheitsmoment in das Quadrat seiner Winkelgeschwindigkeit (vgl. §§. 123—125).

Bezeichnen m_1, m_2, m_3 die Massen der einzelnen Moleküle eines um eine feste Achse drehbaren Körpers und r_1, r_2, r_3 ihre Entfernungen von dieser Achse, so sind $m_1 r_1^2$, $m_2 r_2^2$, $m_3 r_3^2$ ihre Trägheitsmomente und daher das Trägheitsmoment des ganzen Körpers: $T = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + \ldots\ldots$

Will man folglich die ganze Masse des Körpers in einem Punkte in der Entfernung r von der Drehungsachse vereinigen, so muss diese Masse eine solche Grösse m haben, dass

$$mr^2 = T$$

ist, woraus

$$m = \frac{T}{r^2}$$

folgt.

Soll dem Körper die Winkelbeschleunigung γ ertheilt werden, so ist dazu die Kraft

$$P = T\gamma$$

erforderlich, anzubringen in einem Punkt in der Entfernung 1 von der Drehungsachse und senkrecht auf der senkrechten Verbindungslinie dieses Punktes mit der Achse. Umgekehrt bringt eine solche Kraft P die Winkelbeschleunigung

$$\gamma = \frac{P}{T}$$

hervor.

Bezeichnet v die Winkelgeschwindigkeit des Körpers in einem bestimmten Augenblick, so ist seine Bewegungsgrösse

$$Tv$$

und seine lebendige Potenz $\frac{1}{2} Tv^2$;

und bedeutet endlich v' die Winkelgeschwindigkeit desselben Körpers in einem späteren Zeitmoment, A die Summe der Arbeit, welche die auf ihn wirkenden bewegenden Kräfte in der Zwischenzeit geleistet haben, und W die Summe der Arbeit, welche in derselben Zeit zur Ueberwindung der Widerstände erforderlich war, so ist

$$A - W = \frac{1}{2} T (v'^2 - v^2).$$

§. 147. **Schwungradius.** — Manchmal stellt man sich wohl auch die Aufgabe, diejenige Entfernung von der Drehungsachse eines rotirenden Körpers zu finden, in welcher man die unveränderte Masse des Körpers concentriren darf, ohne dessen Be-

wegung zu ändern. Es muss diese Entfernung offenbar so gross sein, dass das Trägheitsmoment jener Masse, also die mit dem Quadrat der gesuchten Entfernung multiplicirte Masse des Körpers, gleich dem Trägheitsmoment desselben wird. Man hat diese Entfernung Schwungradius genannt und sich namentlich in England dieser Grösse anstatt des Trägheitsmomentes bei den Rechnungen bedient.

Bezeichnet M die Masse des rotirenden Körpers, R seinen Schwungradius und T, wie oben, sein Trägheitsmoment, so muss

$$MR^2 = T$$

sein, woraus folgt.

$$R = \sqrt{\frac{T}{M}}$$

§. 148. **Schwingungsmittelpunkt; reducirte Länge des zusammengesetzten Pendels.** — Es ist nun leicht, die Bedingungen für die Lage des Schwingungsmittelpunktes (vgl. §. 137) des zusammengesetzten Pendels aufzufinden. Die einzige, auf das Pendel wirkende und dessen Bewegung hervorbringende Kraft ist die Schwerkraft, die man sich im Schwerpunkt angreifend denken kann. Dieselbe kann aber auch in jeden beliebigen Punkt des Körpers verlegt werden, vorausgesetzt nur, dass ihr statisches Moment, oder, da sie sich fortwährend selbst parallel bleibt, das Product aus ihr in die Entfernung ihres Angriffspunktes von der Drehungsachse dasselbe bleibt. Ebenso kann man die Masse des Körpers in irgend einem Punkt concentriren. Es lässt sich nun immer ein Punkt finden, der so gelegen ist, dass die Masse, welche, die des rotirenden Körpers ersetzend, in ihm concentrirt und die Grösse der Kraft, welche an Stelle der Schwerkraft mit ihrem Angriffspunkt in ihn verlegt wird, einander derart entsprechen, dass letztere das jener Masse entsprechende Gewicht, also gleich jener Masse multiplicirt mit der Beschleunigung der Schwere ist. Dieser Punkt bewegt sich genau so, wie das zusammengesetzte Pendel, er ist also der gesuchte Schwingungsmittelpunkt und seine Entfernung von der Achse die reducirte Länge des Pendels.

Dies lässt sich durch eine sehr einfache Rechnung gar bis zum Ziele verfolgen. Bezeichnet M die Masse und also, unter g die Beschleunigung der Schwere verstanden, Mg das Gewicht des Pendels, ferner T sein Trägheitsmoment, x die gesuchte Entfernung des Sdawingungsmittelpunktes, m die in ihm concentrirte Masse und chher, obiger Bedingung zufolge, mg die in ihn, statt des wirklichen Gewichtes, verlegte Kraft, endlich z die Entfernung des Schwerpunktes von der Drehungsachse, so müssen die beiden Gleichungen:

$$mx^2 = T$$
$$mgx = Mgz$$

erfüllt sein, woraus man durch Division

$$x = \frac{T}{Mz},$$

die reducirte Länge des zusammengesetzten Pendels erhält.

§. 149. **Mitwirkung der Centrifugalkraft bei der Drehung.** — Indem sich ein Körper mit gewisser Geschwindigkeit um eine Achse dreht, macht sich in jedem seiner Moleküle eine gewisse Centrifugalkraft geltend, die sich nach §. 129 leicht bestimmen lässt. Sie ist proportional der Masse dieses Moleküls, proportional dem Quadrat seiner Geschwindigkeit und umgekehrt proportional dem Radius des Kreises, in dem es sich bewegt, also umgekehrt proportional seiner Entfernung von der Drehungsachse. Nun ist die Geschwindigkeit des Moleküls selbst wieder proportional der Winkelgeschwindigkeit des Körpers und proportional seiner, des Moleküls, Entfernung von der Drehungsachse. Desshalb ist die Centrifugalkraft der Masse des Moleküls, seiner Entfernung von der Drehungsachse und dem Quadrat der Winkelgeschwindigkeit direct proportional. Darnach bestimmt sich die Grösse der Centrifugalkraft als das Product aus jenen dreien. Ihre Richtung ist stets die der Senkrechten, welche vom Molekül auf die Drehungsachse gefällt wird und von der Achse abgekehrt. Sämmmtliche Centrifugalkräfte der Moleküle schneiden also die Achse. Man kann sie folglich im Allgemeinen in zwei sich kreuzende Kräfte vereinigen, von denen jede die Achse schneidet. Diese Kräfte stellen die Einwirkungen vor, welche die Achse lediglich in Folge der Drehung des Körpers zu erleiden hat. In gewissen speciellen Fällen werden diese beiden Kräfte die Achse in dem nämlichen Punkte schneiden und sich also in eine einzige Resultante vereinigen lassen; in anderen Fällen werden sie einen Drehzwilling bilden und in noch anderen Fällen endlich werden sie im Gleichgewicht sein; dann heben sich die sämmtlichen Centrifugalkräfte in den Molekülen gegenseitig auf, sodass die Achse von dieser Seite her keine Einwirkung erfährt. Man sagt dann, die Achse sei eine freie Achse.

Bezeichnet m die Masse, v die Geschwindigkeit eines Moleküls und r seine Entfernung von der Drehungsachse, so ist $\frac{mv^2}{r}$ seine Centrifugalkraft. Ist alsdann a die Winkelgeschwindigkeit des Körpers, so ist $v = ar$ und daher die Centrifugalkraft:

$$C = ma^2r.$$

§. 150. Wenn sich eine dünne Scheibe M (Fig. 243) um die auf ihr senkrechte Achse a dreht, so gehen die Richtungen sämmtlicher Centrifugalkräfte der Moleküle durch den Punkt a.

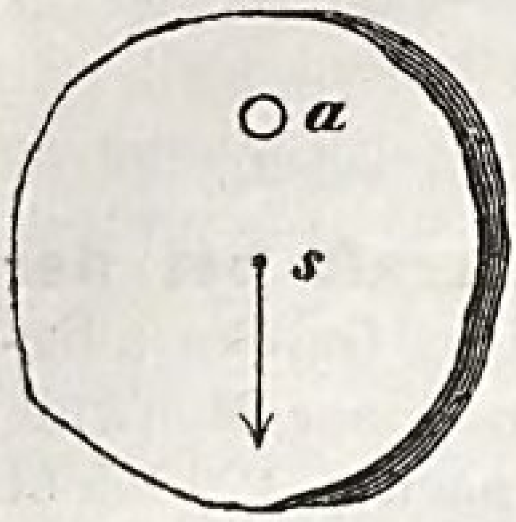


Fig. 243.

Diese Kräfte lassen sich folglich in eine einzige Resultante vereinigen, welche ebenfalls durch *a* geht. Ausserdem lässt sich unschwer nachweisen, dass diese Resultante ihrer Grösse und Richtung nach genau so gross ist als die Centrifugalkraft, welche man erhält, wenn man die ganze Masse der Scheibe in ihrem Schwerpunkt vereinigt. Die gesammte Wirkung der Centrifugalkraft ist also Null, wenn die Achse durch den Schwerpunkt der Scheibe geht, und diese Achse also eine freie.

Bezeichnet M die Masse der Scheibe, z die Entfernung ihres Schwerpunktes von der Drehungsachse und a ihre Winkelgeschwindigkeit, so ist ihre Centrifugalkraft:

$$C = Ma^2z$$

und hat die Richtung der Verbindungslinie von a und s (Fig. 243).

Jeder um eine Achse rotirende Körper lässt sich durch Ebenen, senkrecht auf seine Achse, in Scheiben der eben betrachteten Art zerlegen (Fig. 244). Die Schwerpunkte dieser Scheiben bilden eine gerade oder krumme Linie *abc*. In jedem Punkte dieser Linie greift eine, die Centrifugalkraft der betreffenden Scheibe repräsentirende Kraft an von derselben Grösse, als wenn die Masse der Scheibe in diesem Punkt vereinigt wäre, und in der Richtung der von diesem Punkte auf die Achse gefällten Senkrechten. Liegt daher jene Linie der Schwerpunkte in einer Ebene mit der Achse, so sind jene Centrifugalkräfte sämmtlich parallel; sie lassen sich daher in der Regel in eine einzige Resultante vereinigen, die, wie sich leicht beweisen lässt, dieselbe Grösse hat als die Centrifugalkraft, welche entstehen würde, wenn die ganze Masse des Körpers in seinem Schwerpunkt vereinigt wäre. Der Angriffspunkt jener Resultante aber ist im Allgemeinen nicht der Schwerpunkt. Nur in dem Falle, wo die Linie der Schwerpunkte eine Gerade parallel zur Drehungsachse ist, geht die Resultante der Centrifugalkräfte auch durch den Schwerpunkt des ganzen Körpers. Dies ist z. B. der Fall, wenn der rotirende Körper ein sog. Rotationskörper, d. h. ein solcher ist, der durch Drehen auf der Drehbank erzeugt werden kann, und seine geometrische Achse (d. h. die, um welche er

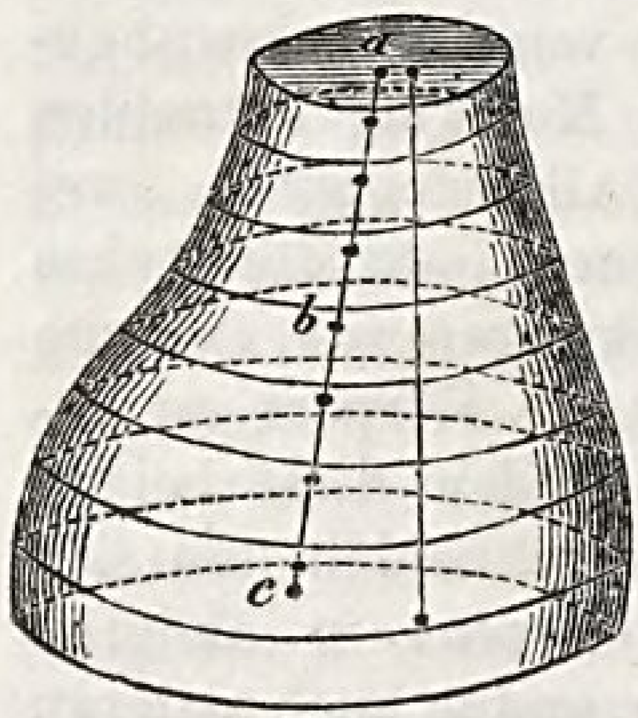


Fig. 244.

sich bei seiner Erzeugung dreht) mit seiner Drehungsachse parallel läuft. Fällt endlich noch in diesem letzteren Falle die Drehungsachse mit der geometrischen zusammen, so ist die gesammte Centrifugalkraft Null und die Drehungsachse somit eine freie.

Die höhere Mechanik weist übrigens nach, dass jeder Körper nicht blos eine, sondern sogar drei freie Achsen hat, die in seinem Schwerpunkt rechtwinklig aufeinander stehen. Es empfiehlt sich somit auch aus diesem Grunde (vgl. §. 68) die Rotationsachse eines Körpers stets durch seinen Schwerpunkt zu legen.

3. Allgemeine Bewegung.

§. 151. **D'Alembert'sches Princip.** — Welcher Art auch immer die durch irgend welche Kräfte hervorgebrachte Bewegung eines Körpers sein mag, jedes seiner Moleküle bewegt sich in einem bestimmten Augenblick nach einer gewissen Richtung hin und mit einer bestimmten Beschleunigung oder Verzögerung (den Fall der gleichförmigen Bewegung oder der Ruhe als besonderen unter jenen mit inbegriffen). Diese Bewegung des Massentheilchens kann man sich aber jedenfalls auch durch eine besondere, an ihm selbst thätige Kraft hervorgebracht denken, die gleich dem Produkt aus der Masse des Moleküls in dessen Beschleunigung ist (also Null, wenn das Molekül ruht oder sich gleichförmig bewegt) und im Sinne der Bewegung oder entgegengesetzt wirkt, je nachdem die Geschwindigkeit zu- oder abnimmt. Nennen wir diese Kraft, da sie aus der Bewegung selbst abgeleitet gedacht wird, Bewegungskraft. Sie ist nothwendig, um die Trägheit des Moleküls zu überwinden. Es ist, als ob das Molekül in Folge seiner Trägheit jener Kraft einen Widerstand entgegensetzte, der ihr genau gleich ist. Man hat desshalb auch, wiewohl unpassend, jene Bewegungskräfte, in entgegengesetzter Richtung genommen, Trägheitskräfte genannt. Bringt man also an jedem Molekül eines Körpers die ihm zugehörige Bewegungskraft an, so wird dadurch dieselbe Bewegung hervorgebracht werden, als durch die ursprünglich gegebenen sog. äusseren Kräfte. Und denkt man sich an jedem Molekül eine, der zugehörigen Bewegungskraft gleiche und gerade entgegengesetzte, also seine Trägheitskraft wirkend, so würde durch diese im Verein mit den gegebenen äusseren Kräften Gleichgewicht hergestellt und folglich die Bewegung des Körpers gleichförmig werden. Man kann daher sagen, dass die gesammten Trägheitskräfte mit den ursprünglich gegebenen Kräften zusammen

dem Körper eine gleichförmige Bewegung ertheilen oder ihn in Ruhe lassen müssen. — Damit sie dies aber thun, muss nach dem Princip der virtuellen Geschwindigkeiten für eine kleine, im nächsten Zeittheilchen erfolgende Bewegung des Körpers die Arbeit der Trägheitskräfte gleich sein der Arbeit der gegebenen äusseren Kräfte. In diesen Sätzen ist das nach seinem Erfinder *d'Alembert* sog. *d'Alembert*'sche Princip ausgesprochen, durch welches, und besonders in seiner Verbindung mit dem Princip der virtuellen Geschwindigkeiten, alle nur denkbaren Probleme der Dynamik wenigstens formell aufgelöst werden können. In vollkommenster Weise hat dies denn auch in der That *Lagrange* in seinem bereits erwähnten Werke „Mécanique analytique" gethan.

§. 152. **Princip der Erhaltung der lebendigen Potenz.** — Jedes Molekül eines bewegten Körpers hat in irgend einem Augenblick eine gewisse Geschwindigkeit, also eine gewisse lebendige Potenz, gleich dem halben Produkt aus der Masse des Moleküls in das Quadrat seiner Geschwindigkeit. In dem nächsten Zeittheilchen der Bewegung wird jene Geschwindigkeit und damit die lebendige Potenz in Folge der Arbeitsleistung der Bewegungskräfte vermehrt (oder vermindert). Die Differenz zwischen der neuen und der vorigen lebendigen Potenz ist gleich der Arbeitsleistung der Bewegungskraft, die an diesem Molekül thätig gedacht werden kann. Addirt man diese Vergrösserungen der lebendigen Potenzen für sämmtliche Moleküle des Körpers, so ist diese Summe offenbar gleich der Summe der Arbeitsleistungen der Bewegungskräfte desselben und daher auch, nach dem vorigen Paragraphen, gleich der Summe der Arbeitsleistungen der gegebenen äusseren Kräfte. Für ein nächstes Zeittheilchen gilt dasselbe, und wenn man folglich irgend zwei Zeitpunkte der Bewegung mit einander vergleicht, indem man für dieselben die Zunahme der lebendigen Potenz jedes Moleküls berechnet und diese Zunahme für sämmtliche Moleküle des Körpers addirt, so ist diese Summe gleich der gesammten, von den gegebenen Kräften in der Zwischenzeit geleisteten Arbeit. Dieser Satz heisst das Princip von der Erhaltung der lebendigen Potenz.

Sei wieder A die Arbeit der bewegenden, W die der widerstehenden Kräfte für irgend einen Abschnitt der Bewegung eines Körpers, m sei die Masse irgend eines Moleküls, desselben, das zu Anfang jenes Abschnittes die Geschwindigkeit v habe, zu Ende desselben aber die v'. Mit $\Sigma \frac{1}{2} m v^2$ bezeichnen wir die Summe der ebendigen Potenzen sämmtlicher Moleküle des Körpers für den Anfang und mit $\Sigma \frac{1}{2} m v'^2$ dieselbe Summe für das Ende des be-

trachteten Bewegungsabschnitts, so ist das Princip der Erhaltung der lebendigen Potenz durch die Gleichung

$$A - W = \Sigma \tfrac{1}{2} m v'^2 - \Sigma \tfrac{1}{2} m v^2$$

ausgedrückt.

Wir müssen hiebei darauf aufmerksam machen, dass wir auch hier, wie schon in dem Beispiel des §. 134, voraussetzen, dass mit den Aenderungen der Geschwindigkeits-Richtungen keine Aenderungen der Grösse derselben, also keine Geschwindigkeitsverluste verbunden sind. Diese Voraussetzung ist, wie sich später zeigen wird, in der That erfüllt, wenn die Bahnen der Moleküle stetige Curven sind. Wenn aber plötzliche Richtungsänderungen vorkommen, so treten Verluste ein, welche die Anwendung des obigen Princips unrichtig machen. Für solche Fälle gibt dann das weiter unten zu besprechende *Carnot*'sche Princip die anzubringende Correction.

§. 153. **Princip der Erhaltung der Bewegung des Schwerpunkts.** — Jedes Molekül eines bewegten Körpers hat in einem bestimmten Augenblick eine bestimmte Bewegungsrichtung und eine bestimmte Beschleunigung in dieser Richtung, welche auch durch eine gewisse in derselben Richtung wirkende Bewegungskraft erzielt gedacht werden kann, — so auch dasjenige Molekül, mit welchem der Schwerpunkt des Körpers zusammenfällt. Man zerlege nun an jedem Molekül, ausser an dem letzteren, die dort thätige Bewegungskraft in zwei wieder an dem Molekül angreifende Componenten, von denen die eine genau gleich und parallel der am Schwerpunkt wirkenden Bewegungskraft ist. Die andere ist dadurch vollkommen bestimmt. Die ersteren Componenten vereinigen sich, wie die Schwerkräfte, in eine im Schwerpunkt angreifende Mittelkraft. Unter dem alleinigen Einfluss dieser Mittelkraft würde der Schwerpunkt nicht blos die nämliche Bewegungsrichtung wie vorhin beibehalten, sondern auch dieselbe Beschleunigung, vorausgesetzt, dass man sich die ganze Masse des Körpers, wie alle jene Componenten, in ihm concentrirt denkt. — Die anderen Componenten, wie sie auch beschaffen sein mögen, können, zusammengesetzt auf die im §. 57 angegebene Weise, nur noch einen Drehzwilling ergeben, oder sie sind für sich im Gleichgewicht. Denn wenn man durch jene Vereinigung zwei sich kreuzende oder schneidende Kräfte erhalten würde, so könnte man dieselben auf die im §. 56 gezeigte Art allemal so verlegen, dass die eine ihren Angriffspunkt im Schwerpunkt hätte. Und die so verlegten Kräfte könnte man dann in eine wiederum im Schwerpunkt angreifende Kraft und

in einen Drehzwilling zerlegen. Jene Kraft würde sich aber mit der schon gefundenen ersten Resultante zu einer von letzterer verschiedenen Mittelkraft vereinigen und dadurch den Schwerpunkt zu einer anderen Bewegung veranlassen, als wir sie ursprünglich von ihm voraussetzten. Jene zweiten Componenten können also in der That nur im Gleichgewicht sein oder doch zusammen nur die Wirkung eines Drehzwillings haben. Und dieser Drehzwilling kann den Körper nur um den Schwerpunkt drehen, nicht die Bewegung des Schwerpunkts selbst beeinflussen, die ja sonst wieder anders werden würde, als wir ursprünglich von ihm voraussetzten.

Wenn man, wie so eben die Bewegungskräfte, nun die ursprünglich vorhandenen äusseren Kräfte, welche an dem Körper wirken, nach §. 57 in eine im Schwerpunkt angreifende Kraft und in einen Drehzwilling zusammenfasst, so können diese nach dem *d'Alembert*'schen Princip keine anderen sein, als die vorhin aus den Bewegungskräften gefundenen. Es lässt sich somit der folgende Satz aussprechen:

Welche Kräfte auch auf das Bewegte wirken, seine Bewegung erfolgt stets so, dass sich der Schwerpunkt unter dem alleinigen Einfluss einer Kraft, die man findet, wenn man sämmtliche Kräfte parallel zu sich selbst in den Schwerpunkt verlegt und in eine Resultante vereinigt, so fortbewegt, als ob die ganze Masse des Körpers in ihm concentrirt wäre, während sich zugleich der Körper um den Schwerpunkt, d. h. um eine Achse dreht, die stets durch den Schwerpunkt geht, deren Richtung aber im Allgemeinen in jedem Augenblick eine andere ist.

Dies ist das Princip der Erhaltung der Bewegung des Schwerpunkts.

Es zieht dieser Satz noch eine wichtige Folgerung nach sich, die wir hervorheben müssen.

Wenn in einem Körper innere Kräfte auftreten, d. h. Spannungen zwischen seinen Molekülen, so sind diese stets paarweise vorhanden und die jedes Paares von gleicher Grösse, aber gerade entgegengesetzter Richtung. Ein solches Paar, in den Schwerpunkt verlegt, ist dort für sich selbst im Gleichgewicht und kann folglich auf die Bewegung dieses Punktes nicht den mindesten Einfluss haben. Die Bewegung des Schwerpunkts wird allein durch die von aussen auf den Körper wirkenden Kräfte bedingt. — Wenn eine Bombe im Fluge zerplatzt,

so werden die Trümmer derselben in Folge der Spannkraft der durch die Entzündung der Füllung sich entwickelnden Gase umhergeschleudert. Diese Spannkräfte sind solche innere Kräfte, wie wir sie oben voraussetzten. Der Schwerpunkt der Trümmer beschreibt daher dieselbe Bahn weiter, wie sie der der ganzen Bombe zurückgelegt haben würde (den Luftwiderstand unberücksichtigt gelassen). Wenn ein Planet, der um die Sonne kreist, plötzlich durch eine Explosion in Trümmer gehen würde, so würde der Schwerpunkt dieser Trümmer dieselbe Bahn weiter verfolgen, wie der des ganzen Planeten, vorausgesetzt, dass nicht einzelne dieser Trümmer anderen Weltkörpern so nahe kommen, dass sich eine Anziehung derselben gegen sie als neu hinzukommende äussere Kraft geltend macht. — Das Zusammenziehen und Nachlassen der Muskeln von Menschen und Thieren wird gleichfalls durch innere Kräfte hervorgebracht. Wenn daher ein Thier eine Höhe herabfällt, so kann es durch keinerlei Anstrengungen seiner Muskeln die Bahn seines Schwerpunkts und daher den Ort abändern, wo es auf dem Boden ankommt. Würde ein Mensch, während er von einer Höhe herabspringt, einen schweren Körper, einen Stein z. B., von sich schleudern, so beschreibt der gemeinschaftliche Schwerpunkt des menschlichen Körpers und des Steins unbekümmert darum seine Bahn fort. — Um vom Boden vertikal in die Höhe zu springen, stemmen wir durch unsere Muskelkraft die Füsse gegen den Boden und rufen dadurch den Widerstand des Bodens als äussere Kraft hervor, der das Emporspringen erst möglich macht. Von einer Unterlage, welche diesen Widerstand nicht zu leisten vermöchte, könnten wir nicht abspringen. — So wird auch die Bewegung der Vögel in der Luft nur durch den Luftwiderstand ermöglicht. Und selbst die Bewegung der Menschen und Thiere auf horizontalem Boden kann nur mit Hilfe des sich stets geltend machenden Widerstandes der Reibung der Füsse an dem Boden vor sich gehen. Auf einer horizontalen und vollkommen glatten Ebene, die durchaus keinen Reibungs-Widerstand darböte, und über welcher sich auch kein Widerstand leistendes Mittel, wie Luft, befände, könnten Menschen und Thiere ihren Schwerpunkt nicht in horizontaler Richtung fortbewegen.

Unter den *äussern* Kräften, die an einem Körper wirken, kommt stets auch die Schwerkraft vor, die man sich ursprünglich an jedem Molekül thätig denken muss. Aber diese sämmtlichen Kräfte geben in jedem Augenblick eine Resultante, gleich dem Gewichte des Körpers, deren Angriffspunkt der Schwerpunkt

ist. Und diese Resultante leistet bei jeder Bewegung des Körpers dieselbe Arbeit wie jene Seitenkräfte zusammen. Diese Arbeit ist nach §. 37 lediglich von der Grösse der Resultante, also von dem Gewichte des Körpers, und von der vertikalen Hebung oder Senkung des Schwerpunkts abhängig. Die Arbeit, die von der Schwerkraft an einem irgendwie bewegten Körper gethan wird oder die zur Ueberwindung der Schwerkraft aufgeboten werden muss, ist also stets gleich dem Producte aus dem Gewichte des Körpers in die vertikale Senkung oder Hebung des Schwerpunkts desselben.

Bezeichnet A die während eines Bewegungsabschnitts geleistete Arbeit der bewegenden Kräfte, welche an einem Körper thätig sind, W die der widerstehenden für denselben Abschnitt, ferner für den Anfang jenes Abschnitts v die Geschwindigkeit irgend eines der Moleküle, dessen Masse m ist, und H die Höhe des Schwerpunkts des ganzen Körpers über einer horizontalen Ebene, v' und H' dieselben Grössen für das Ende des Abschnitts und endlich P das Gewicht des Körpers, so ist

$$A - W = \Sigma \tfrac{1}{2} m v'^2 - \Sigma \tfrac{1}{2} m v^2 + P (H' - H),$$

wo das Zeichen Σ die nämliche Bedeutung hat, wie in der Formel des §. 152.

VII. Fortpflanzung der Bewegung.

§. 154. **Fortpflanzung der Bewegung in den Körpern.** — Wenn eine Kraft an irgend einem Theil eines Körpers angebracht ist, so überträgt sich die Bewegung, welche sie hervorbringt, gewöhnlich auf alle übrigen Theile des Körpers; aber diese Uebertragung geht nicht augenblicklich vor sich. Wenn der Körper vollkommen starr und in seiner Form absolut unveränderlich wäre, dann würde sich allerdings in dem Moment, wo der Theil, welcher der Wirkung der Kraft unmittelbar unterworfen ist, seine Bewegung beginnt, der ganze übrige Körper in Bewegung setzen. Aber man muss sich erinnern, dass jeder Körper aus einer Anzahl von Molekülen besteht, welche nebeneinander liegen, ohne sich zu berühren. Wenn eine Kraft direkt auf eines oder einige von diesen Molekülen wirkt, so setzt sie dieselben unmittelbar in Bewegung; dadurch entfernen sie sich von den benachbarten Molekülen, oder nähern sich nach Umständen auch denselben und veranlassen so eine Störung des Gleichgewichts und eine Entwicklung von Molekularkräften, welche die nächsten Moleküle in Bewegung setzen. Diese ihrerseits veranlassen auf dieselbe Art

die Bewegung der folgenden Moleküle, und so pflanzt sich die Bewegung nach und nach auf alle Moleküle des Körpers fort.

Gewöhnlich geschieht diese Uebertragung der Bewegung in den festen Körpern ausserordentlich rasch, sodass man den ganzen Vorgang ebenso beobachtet, als wenn die Moleküle auf unveränderliche Weise mit einander verbunden wären. In gewissen Fällen dagegen ist die Uebertragung der Bewegung auf die verschiedenen Theile eines Körpers sehr leicht zu bemerken.

Denken wir uns, dass eine Feder, wie wir sie in den §§. 22 und 23 beschrieben haben, mit einem Körper in fester Verbindung sei, dass sie so zu sagen einen integrirenden Theil desselben bildet. Wenn man diesen Körper in Bewegung setzt, indem man die bewegende Kraft an der Feder anbringt, so wird man sehen, wie sich der Theil der Feder, welcher der Wirkung der Kraft unmittelbar ausgesetzt ist, alsbald in Bewegung setzt; dadurch wird die Gestalt der Feder mehr und mehr verändert, und erst wenn dieselbe, freilich meist nach sehr kurzer Zeit, einen gewissen Grad der Gestaltsveränderung erreicht hat, wird der übrige Körper mit fortgerissen.

Etwas ganz Aehnliches findet statt, wenn ein Eisenbahnzug, welcher in Ruhe ist, anfängt sich in Bewegung zu setzen. Die einzelnen Wägen desselben sind untereinander durch Ketten verbunden, welche jedoch nicht unmittelbar, sondern erst durch Vermittlung von Federn an den Wägen befestigt sind. Zwei so verbundene Wägen sind für gewöhnlich, im Zustande der Ruhe, fast in Berührung mit einander; wenn aber eine hinreichend grosse Kraft angewendet wird, die sie zu entfernen sucht, so spannen sich die Federn und die Berührung wird aufgehoben. Sobald die Locomotive, welche sich an der Spitze des Zuges befindet, ihre Zugkraft auf den ersten Wagen ausübt, so setzt sich derselbe in Bewegung; dadurch spannen sich die Federn, durch welche er mit dem zweiten Wagen in Verbindung steht, und nach Verfluss einer gewissen kleinen Zeit beginnt der zweite Wagen sich zu bewegen; die Federn, welche sich zwischen dem zweiten und dritten Wagen befinden, spannen sich nun ihrerseits, bis der dritte Wagen mit fortgezogen wird, und so theilt sich die Bewegung nach und nach dem ganzen Zug mit. Während der Bewegung desselben nehmen die Federn, wenn wir von den Hindernissen der Bewegung, wie bisher immer, absehen, ihre ursprüngliche Gestalt wieder an, und die Wägen kommen wieder in Berührung mit einander; der Zug befindet sich dann in derselben Anordnung, wie vor seinem Abgang und kann als ein

Ganzes, als ein einziger fester Körper in Bewegung betrachtet werden.

Das eben betrachtete Beispiel soll uns den Vorgang veranschaulichen, der zwischen den verschiedenen Molekülen eines festen Körpers, der in Bewegung gesetzt wird, stattfindet und kann so zu sagen als ausserordentlich vergrössertes Bild desselben dienen. Die verschiedenen Wägen des Zugs spielen die Rolle der Moleküle des Körpers, welche sich nach und nach in Bewegung setzen, und die Spannungen der Federn vertreten die Stelle der innern Kräfte, welche sich zwischen diesen Molekülen entwickeln und durch welche die Bewegung fortgepflanzt wird.

Hiebei ist nicht zu übersehen, dass eine Veränderung der gegenseitigen Lage der Moleküle, wie sie im Vorhergehenden beschrieben wurde, immer eine gewisse Arbeitsleistung der äusseren Kräfte in Anspruch nimmt. Wenn daher einem Körper eine bestimmte Geschwindigkeit ertheilt und dabei die gegenseitige Lage seiner Moleküle, d. h. im Allgemeinen seine Gestalt verändert worden ist, so wurde die dabei aufgebotene Arbeit der äussern Kräfte 1) zur Ueberwindung der etwa stattfindenden Widerstände, 2) zur Erzeugung der Geschwindigkeit, also der lebendigen Potenz des Körpers und 3) zur Veränderung der Gestalt desselben verwendet. Wenn der Körper elastisch und seine Elasticitätsgrenze nicht überschritten worden ist, so leistet er natürlich, wenn ihm gestattet wird, seine vorige Gestalt wieder anzunehmen, dieselbe Arbeit wieder, die vorher auf seine Gestaltsveränderung verwendet wurde. Um eine Feder auf einen gewissen Grad zusammenzudrücken, ist eine bestimmte Arbeit erforderlich; wenn aber die Feder den Druck überwindet und ihre ursprüngliche Gestalt wieder herstellt, so leistet sie dieselbe Arbeit wieder, die vorhin zu ihrer Zusammendrückung verwendet wurde.

§. 155. **Vom Stoss zweier Körper.** — Wenn ein Körper in Bewegung einem andern, der sich entweder in Ruhe befindet oder eine andere Bewegung als jener besitzt, begegnet, so entsteht ein Stoss. Die Bewegung der beiden Körper wird plötzlich abgeändert und die Art und Weise, wie dies geschieht, soll hier näher untersucht werden. Wir nehmen der Einfachheit halber zunächst an, dass es sich um zwei kugelförmig gestaltete Körper A und B (Fig. 245) handle, deren Mittelpunkte sich beide auf der nämlichen Geraden und nach der nämlichen durch den Pfeil ange-

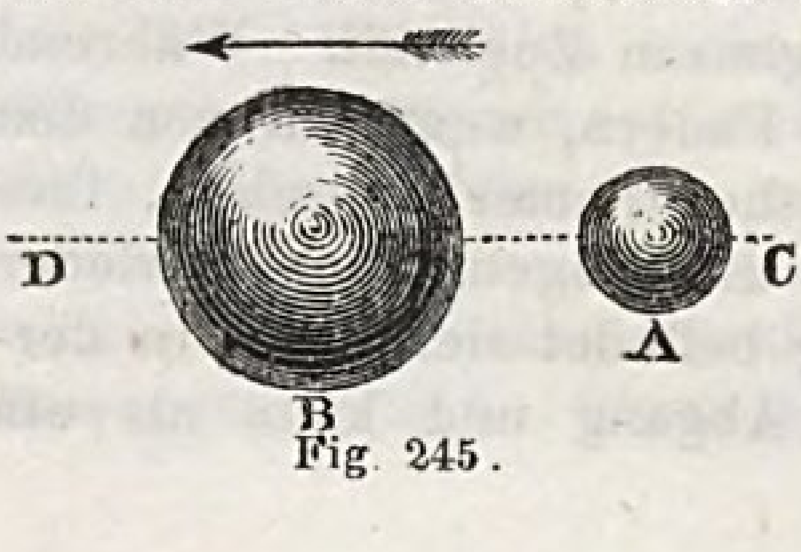


Fig. 245.

zeigten Richtung bewegen (centrischer Stoss). Dann ist es natürlich nothwendig, dass die Geschwindigkeit des hinteren Körpers A grösser als die des vorderen B ist, denn nur dann nähert sich der erstere mehr und mehr dem letzteren, bis zuletzt der Stoss stattfindet.

In dem Augenblick, wo der Körper A auf den Körper B trifft, sucht er die ersten Moleküle dieses Körpers schneller zu bewegen, und diese Beschleunigung der Bewegung überträgt sich durch Vermittlung derselben auf die ganze Masse des Körpers. Aber wir haben gesehen, dass diese Uebertragung der Bewegung nicht augenblicklich zu Stande kommt; es erfolgt zuerst eine Gestaltsveränderung des Körpers B. Die unmittelbar getroffenen Moleküle folgen dem Anstoss, welchen sie erhalten haben; sie nehmen eine grössere Geschwindigkeit an als der übrige Körper und nähern sich folglich seinem Mittelpunkt. Durch die sich entwickelnden Molekularkräfte werden die nächst benachbarten Moleküle auch ihrerseits eine raschere Bewegung annehmen, um sich ebenfalls dem Mittelpunkt des Körpers B zu nähern u. s. f. Am Ende eines gewissen Zeitintervalls, welches freilich immer ausserordentlich klein sein wird, findet sich daher der Körper B an der Stelle, wo der Körper A auf ihn getroffen ist, etwas abgeplattet.

Etwas ganz Aehnliches findet bei dem Körper A statt. Die vordersten Moleküle desselben müssen sich, indem sie auf den Körper B treffen, plötzlich langsamer bewegen; die Verzögerung überträgt sich auf die nächstfolgenden Moleküle u. s. w., sodass sich auch der Körper A an der Stelle, wo die Berührung stattfindet, etwas abplatten muss. Die Fig. 246 zeigt die gleichzeitige Abplattung der beiden Körper, freilich, um sie besser sichtbar zu machen, sehr übertrieben gezeichnet.



Fig. 246.

Von dem Augenblick an also, wo die beiden Körper anfangen sich zu berühren, ändert sich ihre Gestalt mehr und mehr. Zu gleicher Zeit pflanzt sich die Beschleunigung der Bewegung, welche den zuerst getroffenen Molekülen von B gegeben wurde, nach und nach auf die ganze Masse dieses Körpers fort, wie sich auch die Verzögerung der vordersten Moleküle des Körpers A allmählich der ganzenMasse dieses Körpers mittheilt: die Geschwindigkeit des Körpers B nimmt fortwährend zu, die von A fortwährend ab, und es ist klar, dass die Gestaltsveränderung der beiden Körper so lange nicht vollendet ist, als sie noch ungleiche

Geschwindigkeiten haben. Erst in dem Augenblick, wo die beiden Körper gleiche Geschwindigkeit erhalten haben, hat die Gestaltsveränderung derselben ihr Ende erreicht. Was nun von da ab geschieht, ist wesentlich durch die Natur der beiden aufeinander stossenden Körper bedingt.

Wenn die beiden Körper A und B gänzlich unelastisch sind, so suchen sie auf keine Weise ihre ursprüngliche Gestalt wieder anzunehmen. Der Stoss ist beendigt, sobald sie gleiche Geschwindigkeit erreicht haben, und von diesem Augenblick an bewegen sie sich zusammen fort, ohne sich wieder zu trennen. Dies findet z. B. statt, wenn zwei Kugeln von Blei aufeinander stossen.

Wenn dagegen die beiden Körper elastisch sind, wie dies z. B. bei Elfenbeinkugeln der Fall ist, und wenn die Gestaltsveränderung, welche sie erfahren haben, ihre Elasticitätsgrenze noch nicht überschritten hat, dann ist der Stoss in dem Augenblick, wo ihre Geschwindigkeiten gleich geworden sind, nicht beendigt. Die beiden Körper suchen die Gestalt, welche sie vor dem Stosse hatten, wieder anzunehmen; diejenigen ihrer Moleküle, welche vorhin gegen den Mittelpunkt des Körpers, dem sie angehören, getrieben wurden, suchen sich wieder davon zu entfernen und die Lage wieder anzunehmen, welche sie ursprünglich inne hatten; die beiden Körper stossen sich gegenseitig ab. Dadurch wird die Geschwindigkeit des Körpers A noch mehr vermindert, die des Körpers B noch mehr vergrössert, und in Folge dessen trennen sie sich bald wieder, um sich mehr und mehr von einander zu entfernen. Dieser Vorgang findet gerade so statt, als wenn im Moment des Stosses eine Spiralfeder zwischen den beiden Körpern angebracht wäre (Fig. 247). Diese Feder wird anfangs durch den Ueberschuss der Geschwindigkeit des Körpers A über die von B zusammengedrückt und zwar so lange, bis die Geschwindigkeiten dieser beiden Körper gleich geworden sind. Hierauf aber dehnt sie sich wieder aus und entfernt die beiden Körper wieder von einander, indem sie die Geschwindigkeit des Körpers B noch mehr vergrössert und die des Körpers A noch mehr vermindert.

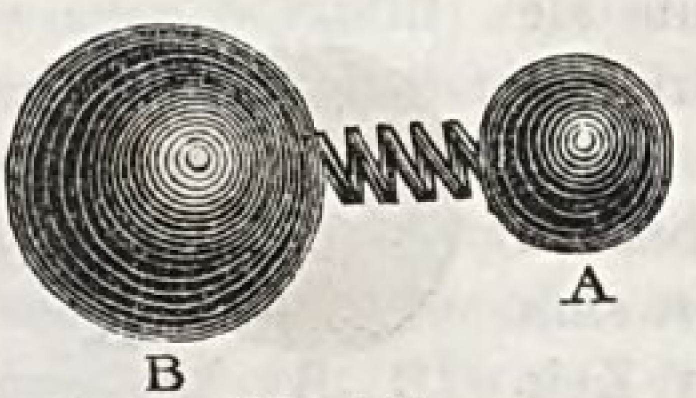


Fig. 247.

Wenn zwei unvollkommen elastische Körper auf einander stossen, so findet eben der zweite Vorgang, den wir oben beschrieben haben, nur theilweise statt; die Körper stellen ihre ursprüngliche Gestalt nur theilweise wieder her, und die fortgesetzte Vermehrung der Geschwindigkeit des vordern und Ver-

minderung der Geschwindigkeit des hintern Körpers findet nicht in dem Maasse statt, wie bei vollkommen elastischen Körpern.

Die Geschwindigkeit des Körpers B nimmt während der ganzen Dauer des Stosses fortwährend zu und behält folglich immer dieselbe Richtung; bei dem Körper A dagegen ist dies nicht immer der Fall. Nach dem ersten Theil des Stosses zwar, in dem Augenblick, wo die beiden Körper dieselbe Geschwindigkeit besitzen, ist diese Geschwindigkeit stets nach derselben Seite hin gerichtet, wie die Anfangsgeschwindigkeit der beiden Körper; die Geschwindigkeit des Körpers A hat sich vermindert, ohne ihre Richtung zu ändern. Aber während des zweiten Theils des Stosses kann die Geschwindigkeit dieses Körpers, indem sie fortfährt abzunehmen, Null werden, bevor der Stoss vollständig beendigt ist, und indem ihn dann der Körper B in Folge der Reaktion der Moleküle, die ihre ursprüngliche Lage wieder einzunehmen suchen, noch fortwährend abstösst, wird er eine Bewegung im entgegengesetzten Sinne erhalten.

Es ist klar, dass in dem Fall, wo sich die beiden Körper vor ihrer Begegnung in entgegengesetzter Richtung bewegen, ganz ähnliche Umstände wie diejenigen, welche wir soeben näher bezeichnet haben, eintreten. Auch der Fall, wo nur einer der beiden Körper vor dem Stoss in Bewegung ist, unterscheidet sich nicht wesentlich von den vorigen.

§. 156. Die Aenderungen, welche der Stoss in den Geschwindigkeiten der beiden Körper, welche auf einander treffen, hervorbringt, können durch eine sehr einfache Betrachtung ermittelt werden. In dem Augenblick, wo die beiden Körper auf einander stossen, üben sie gegenseitig einen Druck auf einander aus. Durch den Druck, welcher von dem hintern auf den vorderen Körper ausgeübt wird, wird die Geschwindigkeit des letzteren vermehrt; durch den entgegengesetzten Druck, welchen der vordere auf den hintern Körper ausübt, wird die Geschwindigkeit dieses hintern Körpers vermindert. Diese beiden Drückungen, die als Kräfte zu betrachten sind, welche die Bewegungen der beiden Körper abändern, sind aber nach dem Princip der gleichen Wirkung und Gegenwirkung einander genau gleich; sie wirken überdies, wie man leicht sieht, genau die nämliche Zeit hindurch auf die betreffenden Körper ein; die Geschwindigkeitsänderungen, welche sie an diesen Körpern hervorbringen, müssen daher nach §. 123 der Masse dieser Körper umgekehrt proportional sein. Wenn die Masse des Körpers B z. B. viermal so gross als die des Körpers A ist, so nimmt seine Geschwindigkeit in einer be-

stimmten Zeit um einen Decimeter zu, wenn die des Körpers A in derselben Zeit um vier Decimeter abnimmt. Die beiden Körper werden also nach Beendigung des ersten Theils des Stosses eine gemeinschaftliche Geschwindigkeit von solcher Grösse besitzen, dass die Geschwindigkeitsänderungen, welche sie zu diesem Behufe erfahren mussten, ihren Massen umgekehrt proportional sind. Man wird daher den Unterschied ihrer anfänglichen Geschwindigkeiten im umgekehrten Verhältniss ihrer Massen theilen. Wenn man dann den entsprechenden dieser Theile zur Geschwindigkeit des Körpers B, dessen Bewegung beschleunigt wird, addirt und den andern von der Geschwindigkeit des Körpers A, dessen Bewegung verzögert wird, abzieht, so muss man beidesmal dieselbe Zahl, die gemeinschaftliche Geschwindigkeit der Körper nach dem ersten Theil des Stosses, erhalten. Mit dieser Geschwindigkeit bewegen sich die beiden Körper fort, wenn sie unvollkommen elastisch sind. In dem Falle aber, wo sie vollkommen elastisch sind und die Elasticitätsgrenze noch nicht überschritten worden ist, finden während des zweiten Theils des Stosses dieselben Geschwindigkeitsänderungen in dem nämlichen Sinne nochmals statt, und daraus kann die Geschwindigkeit jedes der beiden Körper nach vollständig beendigtem Stosse leicht gefunden werden. Im Falle die Körper nur unvollkommen elastisch sind, sind die zweiten Geschwindigkeitsänderungen den ersten nicht mehr vollständig gleich, sie sind um so kleiner, je weniger elastisch die beiden Körper sind.

Nehmen wir an, dass die Masse des Körpers B viermal so gross als die des Körpers A sei, und dass die Anfangsgeschwindigkeit des Körpers A 15^m, diejenige des Körpers B dagegen nur 10^m in der Secunde betrage. Dann ist nach dem Obigen klar, dass durch die Wirkung des Stosses die Geschwindigkeit des A auf 11^m in der Secunde vermindert, die des B dagegen auf eben diese Grösse erhöht wird. In diesem Augenblick ist der Stoss beendigt, wenn die Körper unelastisch sind; sie bewegen sich mit ihrer gemeinschaftlichen Geschwindigkeit von 11^m mit einander fort. Wenn aber die Körper elastisch sind und die Elasticitätsgrenze noch nicht überschritten worden ist, so nehmen sie genau die Gestalt wieder an, welche sie vorhin hatten, und entwickeln dadurch genau dieselben abstossenden Kräfte wieder zwischen sich, wie diejenigen, welche sich während des ersten Theils des Stosses geltend gemacht haben. Die Geschwindigkeit des Körpers B vermehrt sich also nochmals um 1^m und wird 12^m in der Secunde, während diejenige des Körpers B eine

neue Verminderung von 4^m erfährt und dadurch auf 7^m in der Secunde reducirt wird.

Nehmen wir nun an, dass, während die beiden Körper A und B dieselben Massen wie vorhin haben, die Anfangsgeschwindigkeit von A 7^m, diejenige von B 2^m in der Secunde betrage. Dann ist wieder klar, dass die beiden Körper, nachdem sie ihre grösste Gestaltsveränderung erreicht haben, die gemeinschaftliche Geschwindigkeit von 3^m in der Secunde besitzen; die Geschwindigkeit von B musste um 1^m zu-, die von A um 4^m in der Secunde abnehmen. Wenn die beiden Körper elastisch sind und die Elasticitätsgrenze noch nicht überschritten worden ist, wird die Geschwindigkeit von B während des zweiten Theils des Stosses nochmals um 1^m zunehmen und also 4^m in der Secunde werden; aber die Geschwindigkeit von A, welche sich schon um 4^m vermindert hat, und also auf 3^m reducirt worden ist, kann nicht nochmals um 4^m abnehmen: sie wird zunächst vollständig zerstört werden, und darauf wird der Körper eine Bewegung in entgegengesetzter Richtung mit einer Geschwindigkeit von 1^m in der Secunde annehmen.

Wenn sich die beiden Körper A und B, deren Massen immer noch dasselbe Verhältniss wie vorhin zu einander haben sollen, gegeneinander bewegen, A mit der Geschwindigkeit von 7^m in der Secunde von rechts nach links, B mit der Geschwindigkeit von 3^m in der Secunde von links nach rechts, so ist klar, dass im ersten Theil des Stosses ihre beiden Geschwindigkeiten in der Richtung, welche sie haben, vermindert werden müssen, ja dass die des einen sogar allemal umgekehrt werden muss. Die Verminderungen dieser Geschwindigkeiten erhält man aber in diesem Fall offenbar, wenn man die Summe der beiden Geschwindigkeiten im umgekehrten Verhältniss der Massen theilt; es muss also die Geschwindigkeit des Körpers B um 2^m, die des A um 8^m abnehmen, sodass ihre gemeinschaftliche Geschwindigkeit nach dem ersten Theil des Stosses 1^m in der Secunde von links nach rechts beträgt. Wenn die Körper vollkommen elastisch sind findet dieselbe Veränderung der Bewegungen nochmals statt. Nach gänzlicher Beendigung des Stosses wird also der Körper B eine Geschwindigkeit von 1^m in der Secunde von rechts nach links, der Körper A eine Geschwindigkeit von 9^m in der Secunde von links nach rechts besitzen.

Aehnlich, wie in diesen drei Beispielen gezeigt wurde, können die Geschwindigkeitsänderungen durch den Stoss auch in andern Fällen gefunden werden.

In sehr übersichtlicher Weise lassen sich diese Beziehungen durch einige leicht abzuleitende Formeln darstellen. Bezeichne m_1 die Masse des einen, etwa des vorangehenden Körpers B (Fig. 245) und v_1 seine Geschwindigkeit; ebenso m_2 die Masse des zweiten Körpers A und v_2 seine Geschwindigkeit vor dem Stoss. Die Geschwindigkeit, welche beide Körper gemeinschaftlich nach dem Stosse haben, wenn sie unelastisch sind, oder auch die Geschwindigkeit nach dem ersten Stadium des Stosses bei elastischen Körpern sei v_0. Dann hat sich die Bewegungsgrösse des ersten Körpers um $m_1 (v_0 - v_1)$ vergrössert, die des andern um $m_2 (v_2 - v_0)$ verkleinert. Da diese Aenderungen durch gleiche Kräfte und in derselben Zeit hervorgebracht wurden, so müssen sie (nach §. 123) einander gleich sein, also

$$m_1 (v_0 - v_1) = m_2 (v_2 - v_0),$$

woraus

$$v_0 = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

folgt. Für den Fall, dass sich beide Körper gegeneinander bewegen, hat man der einen von obigen Geschwindigkeiten v_1 oder v_2, etwa der des ersten Körpers B, das entgegengesetzte Vorzeichen zu geben, wodurch man erhält:

$$v_0 = \frac{m_2 v_2 - m_1 v_1}{m_1 + m_2};$$

und je nachdem v_0 aus dieser Formel das positive oder negative Vorzeichen erhält, erfolgt die gemeinschaftliche Bewegung beider Körper in derjenigen Richtung, wie sie ursprünglich der Körper A oder B hatte.

Dieselben Formeln würde man auch durch Anwendung des im §. 153 entwickelten Princips der Erhaltung der Bewegung des Schwerpunkts gefunden haben.

Bei vollkommen elastischen Körpern treten in dem nun folgenden zweiten Stadium des Stosses dieselben inneren Kräfte wie im ersten nochmals auf und bringen dieselben Geschwindigkeitsänderungen an den Körpern im nämlichen Sinn nochmals hervor. Daher ist die Geschwindigkeit des ersten Körpers nach der Wirkung der Elasticität

$$v'_1 = v_0 + (v_0 - v_1) = 2 v_0 - v_1$$

und die des zweiten Körpers:

$$v'_2 = v_0 - (v_2 - v_0) = 2 v_0 - v_2,$$

welche also, nachdem man v_0 wie oben berechnet hat, leicht gefunden werden können.

Für ursprünglich entgegengesetzte Bewegungsrichtungen beider Körper hat man wieder v_1 mit entgegengesetztem Vorzeichen zu nehmen und findet so:

$$v'_1 = 2 v_0 + v_1$$
$$v'_2 = 2 v_0 - v_2.$$

Specielle Fälle: Sind beide auf einander stossende Körper gleich gross, also $m_1 = m_2$, so erhält man aus obigen Formeln für ursprünglich gleiche Bewegungsrichtungen derselben:

$$v_0 = \frac{v_1 + v_2}{2}$$
$$v'_1 = v_2$$
$$v'_2 = v_1,$$

d. h. die gemeinschaftliche Geschwindigkeit zweier unelastischer, gleich grosser Körper nach dem Stoss ist gleich dem Mittel ihrer beiden ursprünglichen, und nach dem Stosse vollkommen elastischer Körper haben dieselben ihre Geschwindigkeiten gerade vertauscht.

Für ursprünglich entgegengesetzte Bewegungsrichtungen ist:

$$v_0 = \frac{v_2 - v_1}{2},$$
$$v'_1 = v_2,$$
$$v'_2 = - v_1.$$

Treffen ausserdem in diesem letzteren Fall die Körper mit gleicher Geschwindigkeit v auf einander, so ist

$$v_0 = 0,$$
$$v'_1 = v,$$
$$v'_2 = - v;$$

d. h. sie bleiben beide, wenn sie unelastisch sind, nach dem Stosse in Ruhe, während vollkommen elastische Körper in entgegengesetzten Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit wie vor dem Stosse aus einander fahren.

Ist einer der Körper, der erste B z. B., sehr gross gegen den andern, etwa eine mit der Erde fest verbundene Platte, und ausserdem ursprünglich in Ruhe, so hat man in obigen Formeln $m_1 = \infty$ und $v_1 = 0$ zu setzen und findet so:

$$v_0 = 0$$
$$\text{und } v'_1 = 0,$$
$$v'_2 = - v_2,$$

d. h. bei unelastischem Stosse bleibt der Körper auf der Platte in Ruhe, sind aber beide vollkommen elastisch, so springt der Körper mit gleicher, aber entgegengesetzt gerichteter Geschwindigkeit von der Platte zurück.

§. 157. Das bisher Gesagte kann mittelst Elfenbeinkugeln, die einen sehr grossen Grad von Elasticität besitzen, experimentell nachgewiesen werden. Denken wir uns zunächst zwei gleich grosse Kugeln neben einander aufgehängt (Fig. 248) und die eine von ihnen, A, aus ihrer Gleichgewichtslage entfernt, wie es Fig. 249 zeigt, so wird diese letztere, wenn sie losgelassen wird, zurückfallen und auf die andere stossen. In dem Augenblick, wo der Stoss beginnt, ist die Geschwindigkeit der Kugel B Null; da ferner die Massen der beiden Kugeln gleich gross sind, so muss die eine während des Stosses dasselbe an Geschwindig-

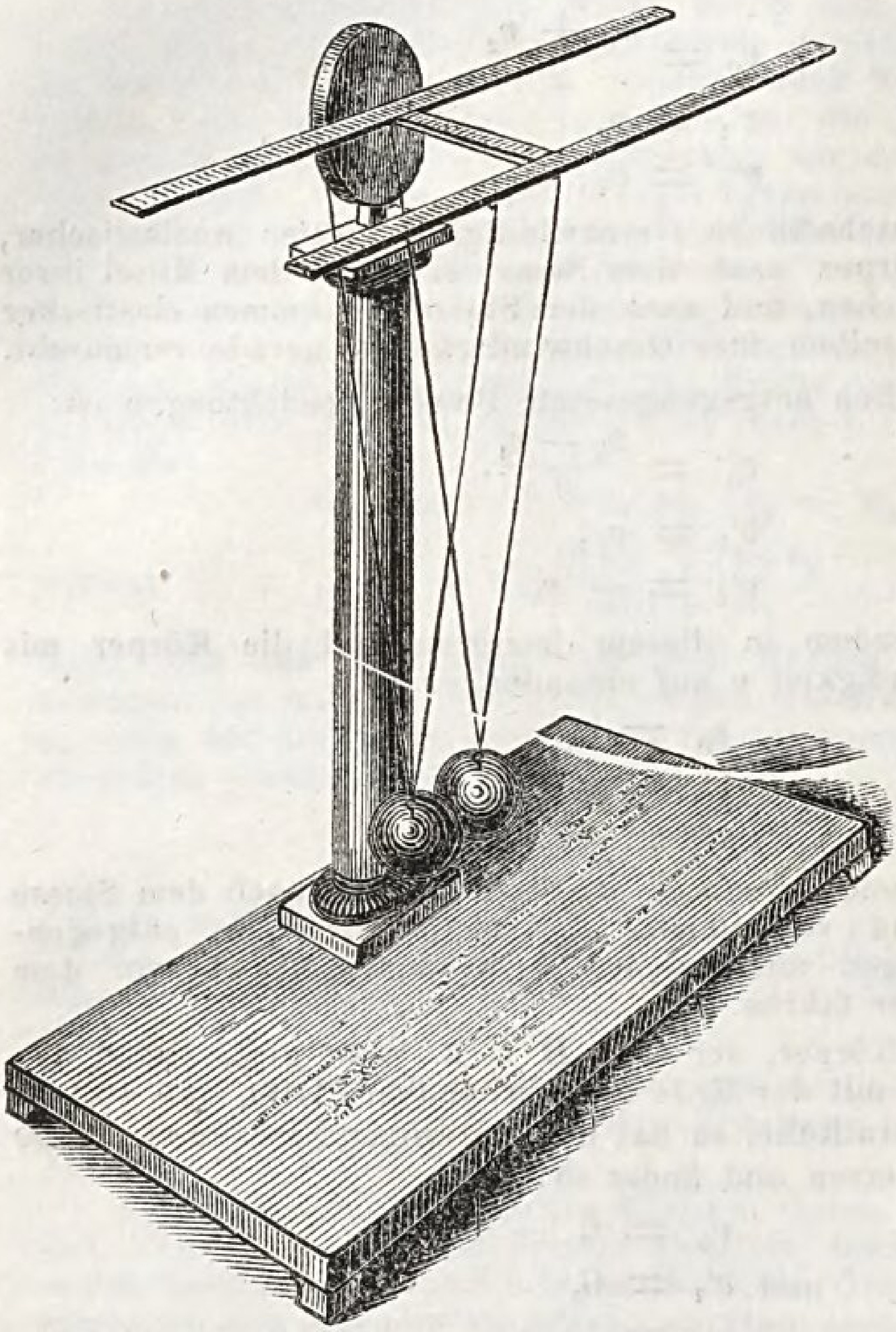


Fig. 248.

keit gewinnen, was die andere verliert. Daraus folgt, dass in dem Augenblick, wo beide Kugeln ihre grösste Gestaltsveränderung erfahren haben, jede von ihnen eine Geschwindigkeit gleich der Hälfte von derjenigen hat, welche die Kugel A zu Anfang des Stosses besass. Während des zweiten Theils des Stosses wird sich die Geschwindigkeit der Kugel B um ebenso viel vermehren, als sie sich schon während des ersten Theils vergrössert hat, d. h. ihre Geschwindigkeit wird am Ende des ganzen Stosses gleich der Anfangsgeschwindigkeit der Kugel A sein; zu gleicher Zeit wird die Geschwindigkeit der Kugel A, welche sich schon auf die Hälfte reducirt hat, nochmals um ebenso viel abnehmen und folglich ganz Null werden. Man soll also beobachten, und man beobachtet es auch in der That, dass nach Beendigung des Stosses die Kugel A unbeweglich stehen bleibt, während die Kugel B in dem Kreisbogen, welchen sie beschreibt, zu derselben Höhe emporsteigt wie die, von welcher die Kugel A herabgefallen ist. Wenn hierauf die Kugel B wieder herabfällt, so stösst sie nun ihrerseits auf die Kugel A; in Folge dessen bleibt sie stehen, und die Kugel A erhebt sich wieder bis zu dem Punkt, von welchem man sie vorhin herabfallen gelassen hat.

Auf diese Art setzt sich die Bewegung fort, bis sie durch den Widerstand der Luft sowohl als durch den an den Aufhängepunkten zerstört wird.

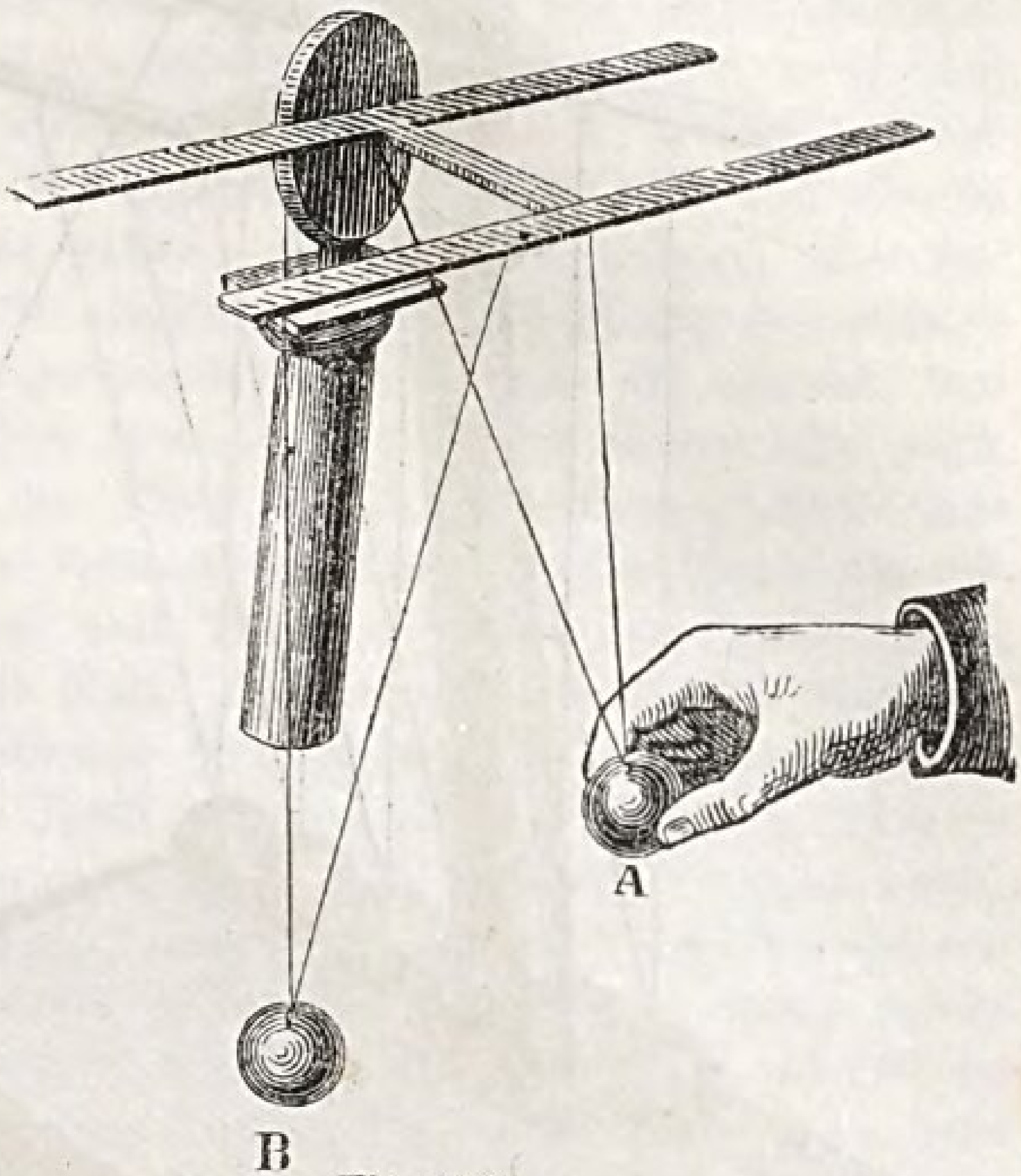


Fig. 249.

Wenn man statt zweier Kugeln eine grössere Anzahl derselben, sieben z. B., neben einander aufhängt, und man entfernt die erste aus ihrer Gleichgewichtslage (Fig. 250), so zeigt sich durch die Wirkung des Stosses, welcher durch das Zurückfallen derselben hervorgebracht wird, eine sehr merkwürdige Erscheinung. Nach dem, was so eben gesagt wurde, würde durch den Stoss der ersten Kugel auf die zweite die ganze Geschwindigkeit der ersten auf die zweite übergehen und jene dadurch zur Ruhe kommen müssen, wenn sonst keine andere Kugel vorhanden wäre. Setzen wir voraus, dass dem auch jetzt noch so sei. Dann stösst die zweite Kugel, welche durch diesen ersten Stoss plötzlich aus dem Zustande der Ruhe in den der Bewegung übergeht, auf die dritte und trägt auf dieselbe ihre ganze Geschwindigkeit über. In Folge dieses zweiten Stosses kommt also die zweite Kugel, die nur während des ausserordentlich kurzen Zeitintervalls zwischen dem ersten und zweiten Stoss in Bewegung war, wieder zur Ruhe. Ganz ebenso wird man einsehen, dass die Geschwindigkeit der dritten Kugel auf die vierte, die der vierten auf die fünfte u. s. w. übergeht, und dass sich endlich die siebente Kugel, welche keinem Hinderniss begegnet, mit derselben Geschwindigkeit aufwärts bewegt, mit welcher die erste Kugel an der zweiten ankam. Das ist es auch in der That, was man beobachtet: nachdem die erste Kugel von einer gewissen Höhe herabgefallen ist, sieht man sie, sobald der Stoss beendigt ist, stillstehen, und gleich darauf fängt die siebente Kugel an, sich zu bewegen, um sich auf dieselbe Höhe zu erheben, von welcher die erste herabgefallen ist. In-

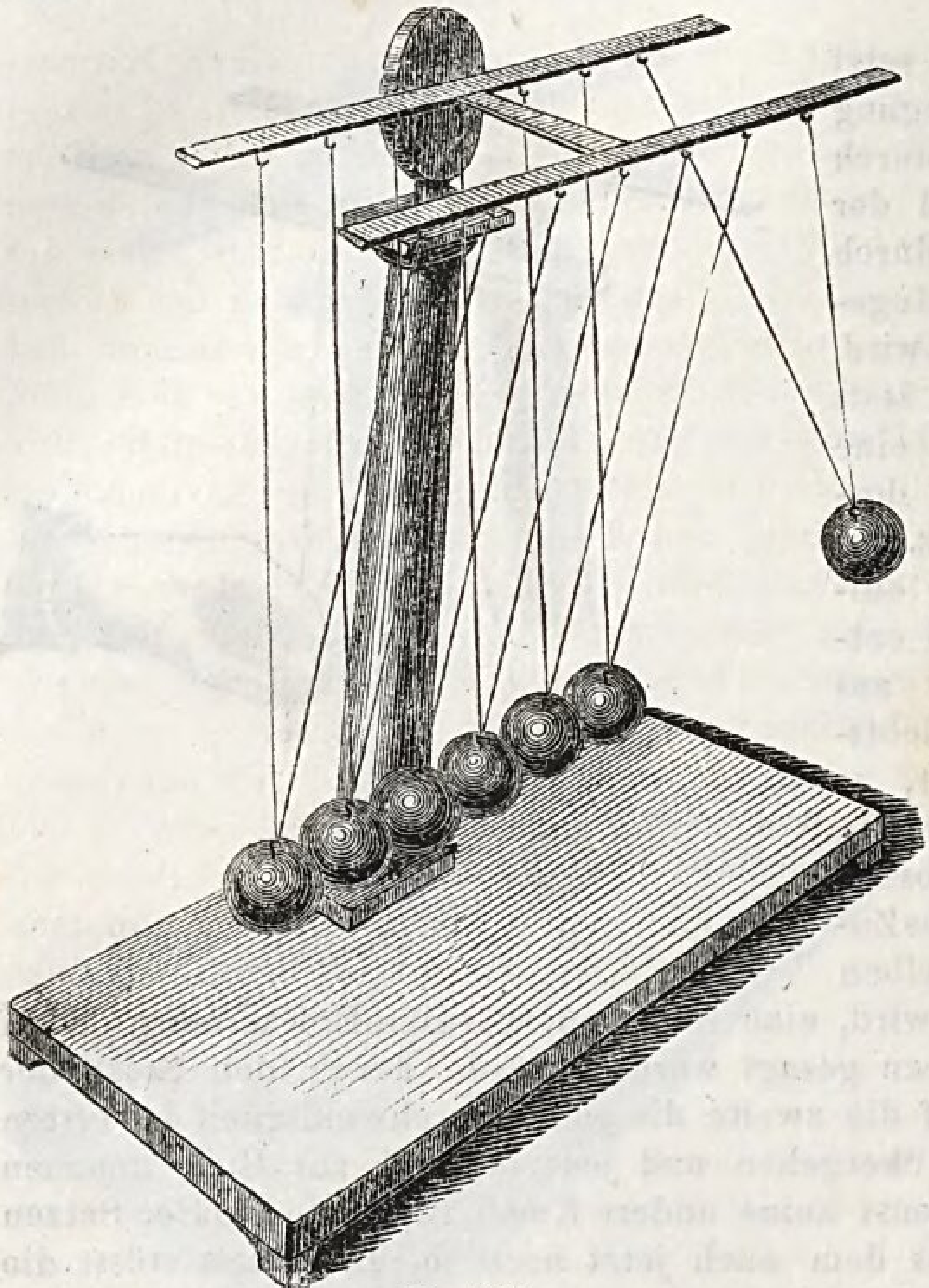


Fig. 250.

dem sie dann wieder herabfällt, bringt sie ihrerseits einen Stoss hervor, in Folge dessen sie zur Ruhe kommt, während wieder die erste Kugel in Bewegung gesetzt wird u. s. f. Die fünf Zwischenkugeln bleiben fortwährend in Ruhe; sie dienen nur zur Uebertragung der Bewegung von der ersten Kugel auf die siebente und umgekehrt, während sich diese beiden äussersten Kugeln ganz so bewegen, als wenn die andern zwischen ihnen gar nicht vorhanden wären.

Dieser Versuch zeigt zugleich sehr entschieden die Richtigkeit dessen, was wir oben über die allmähliche Mittheilung der Bewegung in den Körpern gesagt haben. Wenn sich die Bewegung in dem Moment, wo die erste Kugel auf die zweite stösst, augenblicklich den 6 Kugeln, welche in Ruhe waren, mittheilen würde, so würde der Vorgang ebenso sein, als wenn die erste Kugel auf eine andere stiesse, deren Masse 6mal so gross ist; und es ist leicht einzusehen, dass nach einem solchen Stoss die erste Kugel nicht unbeweglich bleiben könnte. Im Gegentheil aber findet, wie wir gesehen haben, der Stoss der ersten Kugel gegen die zweite so statt, als wenn beide Kugeln allein vorhanden wären, und er ist beendigt, bevor die Bewegung Zeit hatte, sich bis zur dritten Kugel fortzupflanzen.

Wenn man eine Elfenbeinkugel vertikal auf einen Marmor-Tisch, dessen Oberfläche horizontal ist, herabfallen lässt, so springt sie wieder zurück und erhebt sich beinahe bis zu derselben Höhe wieder, von welcher sie herabgefallen ist. Um sich von diesem Vorgang Rechenschaft zu geben, muss man beachten, dass der Marmortisch, welcher sehr elastisch ist, der Wirkung des Stosses nicht das geringste nachgeben kann; er muss als absolut fest betrachtet werden. In dem Moment, wo der Stoss vor sich geht, ändern die Kugel und der Tisch an der Berührungsstelle ihre Gestalt, und wenn diese Gestaltsveränderung ihr Maximum erreicht hat, haben Kugel und Tisch dieselbe Geschwindigkeit, d. h. die Geschwindigkeit Null. Die Kugel verliert also während des ersten Theils des Stosses ihre ganze Geschwindigkeit und erhält daher im zweiten Theil dieselbe Geschwindigkeit, aber in entgegengesetzter Richtung, wieder, die sie vorher schon hatte.

Die Gestaltsveränderung, welche Kugel und Tisch bei diesem letzten Versuch im Moment des Stosses erfahren, kann leicht dadurch bemerklich gemacht werden, dass man die Oberfläche des Tisches mit etwas Graphit leicht schwärzt. Wenn man dann die Kugel herabfallen lässt, so bemerkt man auf dem Tisch einen etwas helleren, auf der Oberfläche der Kugel einen gleich grossen, leicht schwarz gefärbten Kreis. Diese Kreise sind bedeutend grösser, als wenn man die Kugel, ohne einen Stoss hervorzubringen, einfach auf den Tisch gesetzt hätte.

Wenn man auf dieselbe Art eine Bleikugel auf einen mit Blei belegten Tisch herabfallen lässt, so bleibt dieselbe auf dem Tisch liegen, ohne zurückzuspringen. Die Gestaltsveränderung, welche bei vollkommen elastischen Körpern während des zweiten Theils des Stosses vollständig wieder verschwindet, ist in diesem Fall eine bleibende und kann sowohl auf dem Tisch als auf der Kugel recht gut wahrgenommen werden.

§. 158. Wir haben bisher von der Grösse der Kräfte, welche die Geschwindigkeitsänderungen an den beiden sich stossenden Körpern hervorbringen, noch gar nichts weiter gesagt; und in der That lässt sich auch, wie wir sogleich sehen werden, nur wenig darüber ermitteln. Wir haben schon oben bemerkt, dass die beiden Kräfte, welche die Aenderungen der Geschwindigkeit an jedem der beiden Körper hervorbringen, gleich gross sein müssen, und dass ihre Wirksamkeit genau gleich lange dauert. Es folgt daraus, dass die Aenderungen, welche die Bewegungsgrössen, die beide Körper vor dem Stosse hatten, während des Stosses erfahren, ebenfalls gleich gross sein müssen, woraus wir

schon oben geschlossen haben, dass die Aenderungen der Geschwindigkeiten der beiden Körper ihren Massen umgekehrt proportional sind. Nun ist bekanntlich die Aenderung der Bewegungsgrösse eines Körpers gleich dem Product aus der Kraft, welche diese Aenderung hervorgebracht hat, in die Zeit, welche dazu erforderlich war. Man erhält daher die Grösse der beim Stoss wirksamen Kraft, wenn man die Aenderung in der Bewegungsgrösse eines der beiden Körper durch die Dauer des Stosses dividirt. Nun ist aber diese Dauer stets ungemein klein, fast immer so klein, dass sie gar nicht mehr gemessen werden kann. Es folgt daraus zunächst, dass beim Stoss gewöhnlich sehr grosse Kräfte in Wirksamkeit kommen, wie ja auch die Erfahrung täglich zeigt; dann aber folgt auch, dass der Stoss mit um so grösserer Kraft stattfindet, je kürzere Zeit er dauert, je härter, wie man im Allgemeinen sagen kann, die Körper sind, welche aufeinander treffen. Desshalb wendet man den Stoss, namentlich den zwischen harten Körpern, überall da an, wo es sich darum handelt sehr grosse Kräfte hervorzubringen, so beim Zerschlagen eines Körpers, beim Hämmern, beim Einrammen der Pfähle u. s. w. f. Wenn man in andern Fällen die schädlichen Wirkungen, welche die durch Stösse entwickelten Kräfte mit sich führen, möglichst abschwächen will, so sorgt man dafür, dass die Körper, deren Aufeinanderstossen unvermeidlich ist, möglichst weich und elastisch sind. Dadurch wird die Dauer des Stosses verlängert und die Intensität desselben in demselben Verhältniss geschwächt. Daher die Anwendung der Puffer bei den Eisenbahnwägen.

Um eine Idee von der Grösse der Kräfte, welche sich beim Stoss entwickeln, zu erhalten, wollen wir uns vorstellen, dass ein 30^k schwerer Hammer, welcher blos durch sein eigenes Gewicht herabfällt, mit einer Geschwindigkeit von 5^m in der Secunde auf dem Amboss oder auf dem zu schmiedenden Stück, welches auf demselben liegt, ankomme und nach dem Stoss darauf liegen bleibe. Dann wird die ganze Bewegungsgrösse dieses Hammers, welcher er bei Beginn des Stosses besessen hat, und die gleich $\frac{30}{9,8} \times 5 = 15,3$ ist, durch die Kraft des Stosses vernichtet; diese Kraft ist folglich, je nachdem die Dauer des Stosses $^1/_{10}$, $^1/_{100}$ oder $^1/_{1000}$ Secunde beträgt, gleich 153, 1530 oder 15300^k.

§. 159. Die Bewegungen der beiden Körper vor dem Stosse sind nicht immer so einfach, wie wir es bisher vorausgesetzt haben. Aber nach dem Vorhergehenden ist es nun leicht, sich auch in zusammengesetzteren Fällen von den verschiedenen Um-

ständen des Stosses Rechenschaft zu geben. Es seien A und B (Fig. 251) die beiden Körper, welche aufeinander stossen; C D stelle die Geschwindigkeit des ersteren, C′ D′ die des zweiten in dem Augenblick, wo der Stoss beginnt, der Grösse und Richtung nach vor; *o* sei der Punkt, wo sich die beiden Körper berühren und *m n* die gerade Linie, welche in dem Punkte *o* senkrecht auf ihrer gemeinschaftlichen Oberfläche steht und gewöhnlich Stosslinie genannt wird.

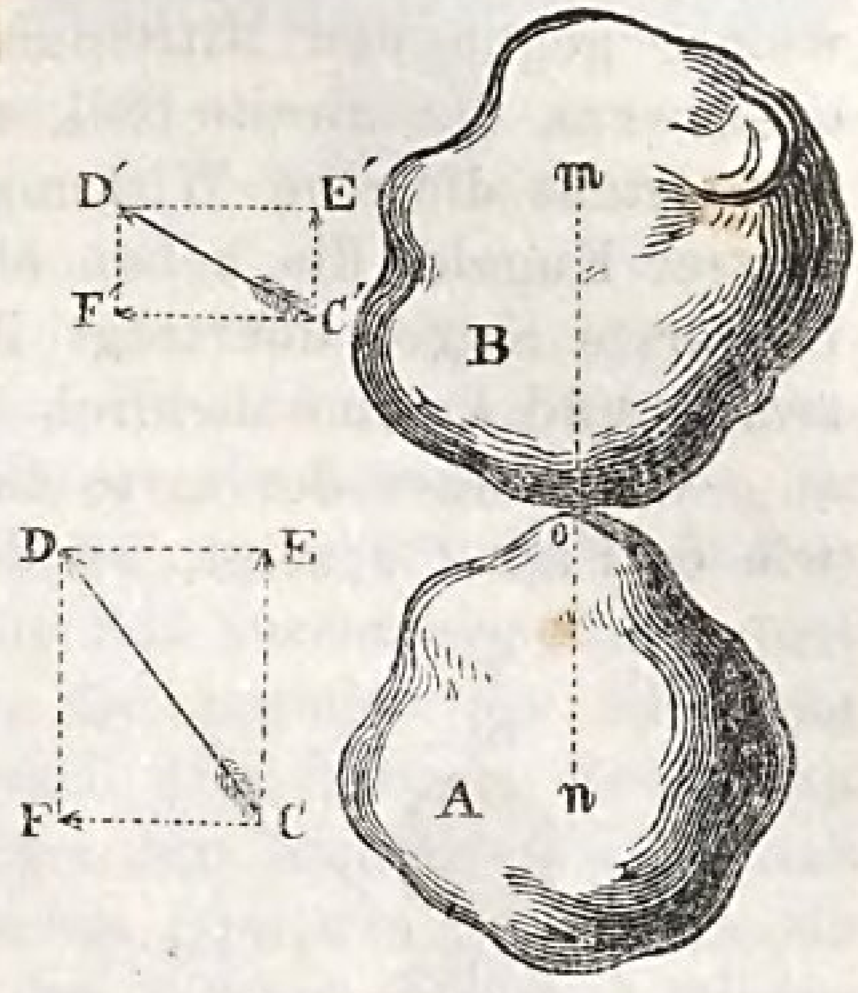


Fig. 251.

Nach dem, was wir in §. 17 gesehen haben, kann der Körper A so betrachtet werden, als wenn er zwei Geschwindigkeiten zugleich besässe, von denen die eine CE parallel zur Linie *m n*, die andere CF senkrecht zu derselben gerichtet ist. Ebenso wird man die Geschwindigkeit C′ D′ des Körpers B in die Geschwindigkeit C′ E′ parallel zu *m n* und in die C′ F′ senkrecht auf *m n* zerlegen können.

Wenn die Körper A und B in dem Augenblick, wo sie sich zu berühren anfangen, die Geschwindigkeiten CF und C′F′ allein besässen, so würden sie nur übereinander weggleiten, und es würde kein Stoss stattfinden. Der Stoss kann also nur von den Geschwindigkeiten CE und C′E′ herrühren, und es ist klar, dass, wenn überhaupt ein solcher stattfinden soll, erstere grösser als letztere sein muss. In Folge dieser beiden ungleichen Geschwindigkeiten geht aber dann der Stoss ebenso vor sich, als wenn sie allein vorhanden wären, und die Aenderungen, welche sie durch die gegenseitige Wirkung der Körper aufeinander erfahren, können genau so wie oben gefunden werden. Man darf dann nur noch die Geschwindigkeiten CF und C′ F′, welche der Stoss nicht geändert hat, mit den Geschwindigkeiten, welche die Körper parallel zur Linie *m n* nach dem Stoss besitzen, vereinigen, um die Geschwindigkeiten der beiden Körper in dem Moment zu finden, wo sie sich von einander trennen. Folgende zwei Beispiele, die vom Billardspiele hergenommen sind, werden die Anwendung des oben Gesagten zeigen können.

§. **160.** Wenn auf dem Billard ein in Bewegung befindlicher Ball auf einen ruhenden trifft, so entsteht ein Stoss; sehen

wir zu, in welcher Richtung und mit welcher Geschwindigkeit sich die beiden Bälle nach dem Stoss bewegen müssen.

Wenn sich der erste Ball in einer geraden Linie bewegt, welche gegen den Mittelpunkt des zweiten Balls gerichtet ist, oder wenn der zweite Ball, wie man sagt, voll genommen wird, so entsteht dieselbe Wirkung wie bei dem Stoss zweier gleich grosser Kugeln, die neben einander aufgehängt sind (Seite 325). Die erste Kugel überträgt ihre ganze Geschwindigkeit auf die zweite und kommt dadurch selbst zur Ruhe.

Wenn aber der erste Ball den zweiten von der Seite trifft, wie es Fig. 252 zeigt, wo die Linie AB den Weg darstellt, den der Mittelpunkt des ersten Balls vor dem Stoss durchlaufen hat, so ist der Vorgang nicht mehr derselbe. Die Geschwindigkeit BC des ersten Balls kann in zwei Componenten BD und BE zerlegt werden, von denen die eine nach der Verbindungslinie der Mittelpunkte der beiden Bälle, also senkrecht auf ihrer Oberfläche in dem Berührungspunkte, die andere senkrecht zur ersten gerichtet ist. Der Stoss erfolgt lediglich in Folge der Geschwindigkeit BD, als wenn diese allein vorhanden wäre. Das Resultat dieses Stosses zwischen den zwei Bällen, die wir als gleich gross voraussetzen, ist bekanntlich, dass sich die Geschwindigkeit BD des ersten Balls vollständig auf den zweiten überträgt. Nach dem Stoss besitzt also der erste Ball nur noch die Geschwindigkeit BE und wird sich mit dieser Geschwindigkeit in der Richtung BF fortbewegen. Der zweite Ball hat durch den Stoss die Geschwindigkeit BD erhalten und wird sich mit ihr nach der Linie BG in Bewegung setzen. Man sieht daraus, dass die Richtungen, nach welchen sich die beiden Bälle nach dem Stoss fortbewegen, allein von der Lage des Punktes abhängen, in welchem sich dieselben während des Stosses berühren.

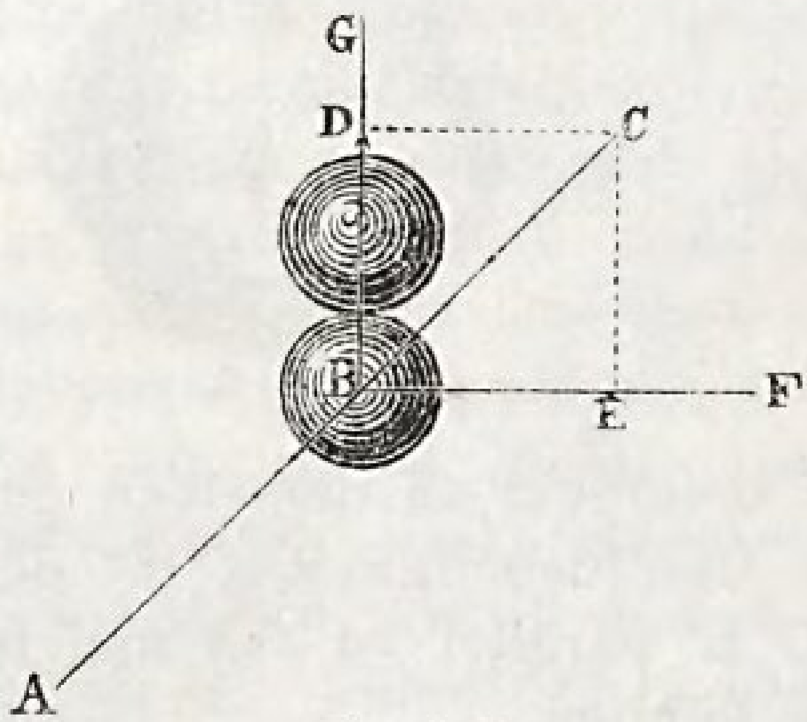


Fig. 252.

Nehmen wir zweitens an, dass ein Ball, welcher sich nach der Linie AB (Fig. 253) bewegt, auf eine der Banden des Billards treffe. Die Geschwindigkeit BC des Balls kann wieder in zwei Componenten zerlegt werden, von denen die eine BD senkrecht zur Bande, die andere BF parallel dazu gerichtet ist. Der Stoss wird ebenso stattfinden, als wenn die Componente BD allein vorhanden wäre. Weil die Bande, welche wir als vollkommen

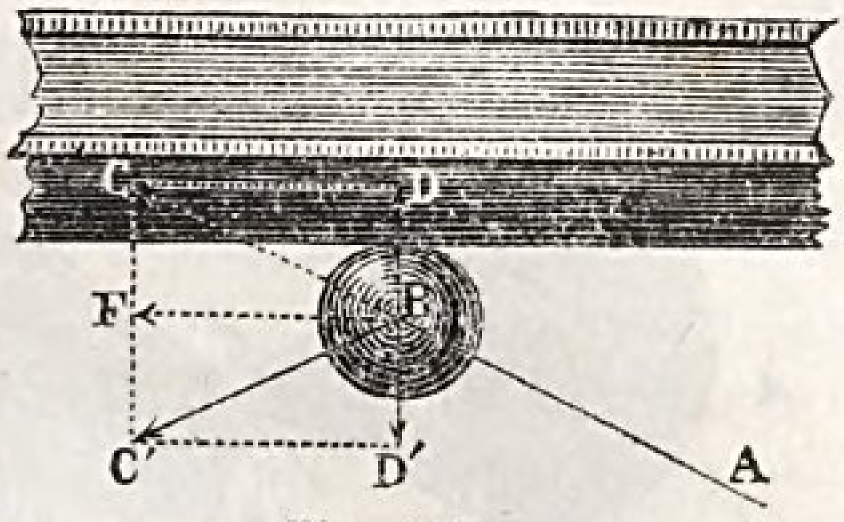


Fig. 253.

elastisch voraussetzen, dem Stoss nicht mehr ausweichen kann, so wird die Geschwindigkeit BD während des ersten Theils des Stosses vollständig aufgehoben; während des zweiten Theils aber erhält der Ball eine Geschwindigkeit BD', die seiner ursprünglichen gleich, aber von entgegengesetzter Richtung ist. Um daher die Geschwindigkeit des Balls in dem Moment, wo er die Bande verlässt, zu finden, muss man die Geschwindigkeit BF, welche nicht verändert worden ist, mit der Geschwindigkeit BD zusammensetzen, und erhält so die Geschwindigkeit BC', die zugleich die Richtung angibt, in welcher sich der Ball nach dem Stoss in Bewegung setzt. Man bemerkt dabei leicht, dass der Winkel C'BD' gleich dem Winkel CBD ist, denn die beiden Dreiecke, in denen sie gelegen sind, sind congruent; aber der Winkel CBD ist wieder gleich dem Winkel ABD', als Scheitelwinkel, und folglich ist auch der Winkel ABD' gleich dem Winkel C'BD'. Man drückt dies gewöhnlich so aus: Der Einfallswinkel (ABD') ist gleich dem Zurückwerfungswinkel (C'BD').

In dem Vorstehenden wurde vorausgesetzt, dass die sich stossenden Bälle eine rein fortschreitende Bewegung haben. Wo aber zugleich mit der fortschreitenden Bewegung eine Drehung vorhanden ist, wie es auf dem Billard immer vorkommt, da erleiden die Erscheinungen oft sehr auffallende Modificationen. Ebenso üben bei nicht vollkommen glatten Körpern, wie sie ja niemals vorkommen, die Seitengeschwindigkeit CF, C'F' (Fig. 251) ein Bestreben aus, die Körper zu drehen. Aber wir können hier nicht näher auf diese complicirteren Fälle eingehen.

§. 161. **Stoss zwischen Körpern, welche sich um feste Achsen drehen. Ballistisches Pendel.** — Von bedeutend praktischem Interesse ist der Fall, wo, wie in Fig. 254 angedeutet, zwei um Achsen *a*, *b* rotirende Körper A, B in einem Punkte C gegen einander stossen. Es ist nicht schwer, diesen Fall auf den in §. 159 behandelten zurückzuführen, wo zwei freie Körper in beliebigen Richtungen gegen einander trafen. Mittelst der Lehre vom Trägheitsmomente sich drehender Körper (§. 146) können wir die Massen berechnen, welche, im Zusammenstossungspunkte C concentrirt gedacht, die der rotirenden Körper A und B ersetzen können. Diese Massen haben in dem Augenblick des Zusammenstossens Geschwindigkeiten, welche aus

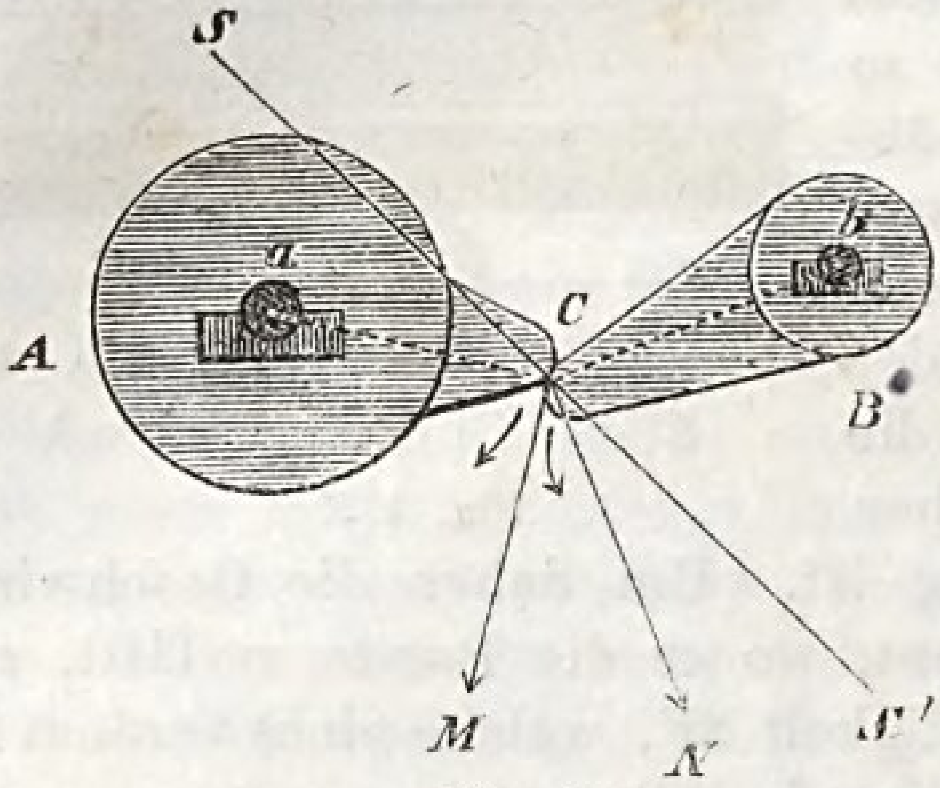


Fig. 254.

der Winkelgeschwindigkeit der beiden Körper und aus den Entfernungen des Punktes C von den Achsen *a* und *b* leicht berechnet werden können. Die Richtungen dieser Geschwindigkeiten sind die der Tangenten an die Kreise, welche die Punkte, wo sich die Körper treffen, im Augenblicke des Stosses zu beschreiben im Begriffe sind, oder auch die der Senkrechten CM, CN auf die Radien *a*A, *b*A jener Kreise. Man zerlegt diese Geschwindigkeiten wieder in zwei Componenten, von denen die eine in der Richtung der Senkrechten auf der gemeinschaftlichen Oberfläche, in welcher sich die Körper berühren, liegt, während die andere senkrecht dazu ist, und verfährt überhaupt so, wie wenn bei C die oben aus den Trägheitsmomenten berechneten Massen wie zwei freie Körper auf einander stiessen.

In ganz ähnlicher Weise lässt sich auch der Fall behandeln, wo ein freier Körper B (Fig. 255) gegen einen um eine Achse drehbaren A stösst. Man wird wieder die Masse des drehbaren Körpers durch eine im Zusammenstossungspunkte C concentrirte, aus dem Trägheitsmomente des Körpers berechnete Masse ersetzen, welche die dem Punkte C zukommende Geschwindigkeit hat und gegen welche der Körper B stösst.

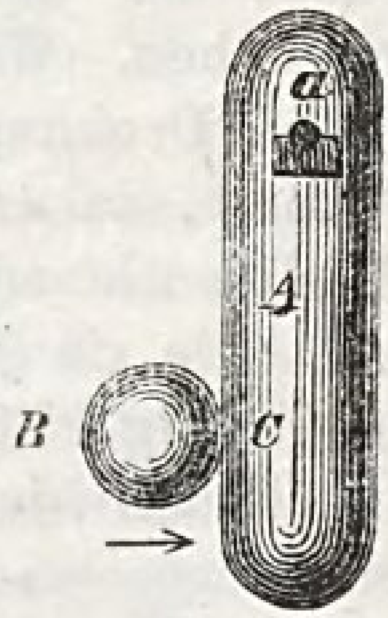


Fig. 255.

Dieser letztere Fall findet eine praktische Anwendung bei dem sog. ballistischen Pendel, eines der vorzüglichsten Mittel, welches die Artillerie zur Bestimmung der Anfangsgeschwindigkeit der Geschützkugeln anwendet. Dasselbe besteht aus einem starken, mit eisernen Bändern eingefassten Holzblock M (Fig. 256), der pendelartig in Schneiden aufgehängt ist, um welche er sich möglichst leicht bewegen kann. Auf der Vorderfläche dieses Holzblocks, welche dem Geschütze, aus welchem die Kugel abgeschossen wird, zugekehrt ist, ist eine Oeffnung angebracht, welche, wenn nöthig, immer wieder mit frischem Holz oder Thon ausgefüllt wird. Gegen diese weiche, unelastische Masse stösst die Kugel und bleibt in derselben stecken. Das anfangs in Ruhe befindliche Pendel erhält dadurch eine gewisse Geschwindigkeit, in Folge

deren es sich um einen bestimmten Winkel aus seiner Gleichgegewichtslage erhebt. Aus diesem Winkel, der an dem unten angebrachten Kreisbogen gemessen werden kann, lässt sich umgekehrt die Geschwindigkeit berechnen, mit welcher das Pendel seine Gleichgewichtslage verliess, und hieraus wiederum ergibt sich die Geschwindigkeit, mit welcher die Kugel das Pendel traf.

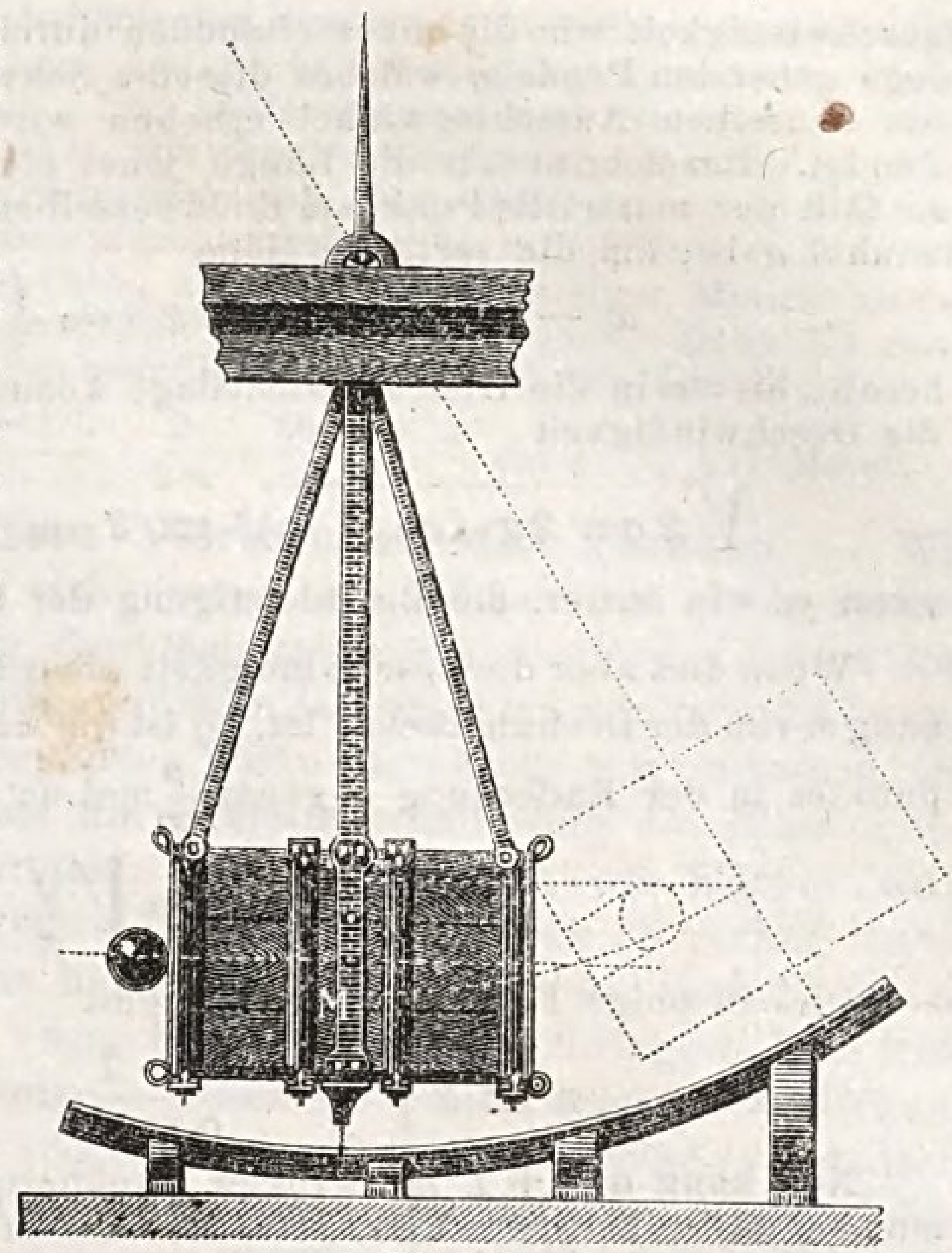


Fig. 256.

Es ist nicht schwer, diese Rechnungen durchzuführen. Bezeichne m die Masse der Kugel und v ihre Geschwindigkeit, ferner M die Masse des ballistischen Pendels, T sein Trägheitsmoment für seine Drehungsachse und a die Entfernung des Punktes, wo es von der Kugel getroffen wird, von jener Achse. Dann ist $\frac{T}{a^2}$ die Masse, welche, in letzterem Punkte concentrirt, die ganze Masse des Pendels ersetzen kann. Da der Stoss der Kugel gegen das Pendel als ein sog. centrischer zu betrachten ist, so ist nach den Formeln des §. 156 für $v_1 = v$ und $v_2 = 0$ die Geschwindigkeit zu Ende des zwischen unelastischen Körpern stattfindenden Stosses

$$v_0 = \frac{mv}{m + \frac{T}{a^2}}$$

und daraus die Geschwindigkeit der Kugel vor dem Stosse

$$v = v_0 \frac{a^2 m + T}{a^2 m}.$$

Hierin ist nun noch zu ermitteln, wie man die Geschwindigkeit v_0 aus dem Ausschlagwinkel des Pendels bestimmt. Wenn das Pendel nach dem Stoss sich selbst überlassen wird, so schwingt es den Bogen, den es eben hinauf gestiegen ist, wieder herab und kommt (vom Reibungs- und Luftwiderstand abgesehen) mit derselben Winkelgeschwindigkeit in seiner Gleichgewichtslage wieder an, mit der es von derselben ausgegangen ist. Dieses ist aber die nämliche Winkel-

geschwindigkeit wie die eines einfachen durch seine Gleichgewichtslage gehenden Pendels, welches dieselbe Schwingungsdauer hat und um denselben Ausschlagwinkel erhoben wird wie das ballistische Pendel. Bezeichnen wir die Länge jenes einfachen Pendels mit x, so fällt der materielle Punkt am Ende desselben, wenn der Ausschlagwinkel α ist, um die vertikale Höhe

$$x - x \cos \alpha = 2x\,(\sin \tfrac{1}{2}\alpha)^2$$

herab, bis er in die Gleichgewichtslage kommt und erhält dadurch die Geschwindigkeit

$$\sqrt{2g\,.\,2x\,(\sin \tfrac{1}{2}\alpha)^2} = 2 \sin \tfrac{1}{2}\alpha \sqrt{g\,x},$$

wenn g, wie immer, die Beschleunigung der Schwere bezeichnet.

Wenn dies aber die Geschwindigkeit eines Punktes in der Entfernung x von der Drehungsachse ist, so ist die des Zusammenstossungspunktes in der Entfernung a genau $\frac{a}{x}$ mal so gross und also

$$v_0 = 2a \sin \tfrac{1}{2}\alpha \sqrt{\frac{g}{x}}.$$

Dies in obige Formel eingeführt, gibt

$$v = 2\sqrt{\frac{g}{x}}\,\frac{a^2 m + T}{a\,m} \sin \tfrac{1}{2}\alpha.$$

Nun kann $a^2 m + T$ mit grosser Annäherung als das Trägheitsmoment des ballistischen Pendels sammt der in ihm steckenden Kugel betrachtet werden. Für dasselbe kann man, mit z die Entfernung des Schwerpunktes dieser Verbindung von der Drehungsachse bezeichnet, nach §. 148 das Product $(M + m)\,x\,z$ setzen. Thut man dies in obiger Formel, so kommt

$$v = 2\sqrt{g\,x}\;\frac{z}{a}\,\frac{M + m}{m} \sin \tfrac{1}{2}\alpha,$$

worin nun statt der Massen M und m auch die Gewichte P und p des Pendels und der Kugel gesetzt werden können:

$$v = 2\sqrt{g\,x}\;\frac{z}{a}\,\frac{P + p}{p} \sin \tfrac{1}{2}\alpha.$$

Endlich kann man die Grösse x noch aus der Schwingungsdauer des ballistischen Pendels bestimmen. Ist diese t und bezeichnet π die Ludolphs'che Zahl, so ist nach §. 136

$$t = \pi\sqrt{\frac{x}{g}}$$

und daher

$$\sqrt{g\,x} = \frac{g\,t}{\pi}.$$

Obige Formel wird also:

$$v = \frac{2gt}{\pi}\cdot\frac{z}{a}\cdot\frac{P + p}{p} \sin \tfrac{1}{2}\alpha.$$

Beispiel: Ein ballistisches Pendel von 2000 Kilogramm Gewicht werde durch eine Kugel von 3^k in Schwingungen versetzt, deren Amplitude 12° beträgt. Der Abstand seines und der darin steckenden Kugel Schwerpunkts von der Drehungsachse betrage 2 Meter und der Abstand der Schusslinie von eben dieser Achse, oder nahezu der Abstand des Zusammenstossungspunktes $2^1/_4$ Meter. Die Zahl der Schwingungen endlich, die das Pendel in einer Minute macht, sei 40, seine Schwingungsdauer also $1^1/_2$ Secunden. Dann ist nach obiger Formel die Geschwindigkeit der Kugel vor dem Stoss:

$$v = \frac{2 \times 9{,}8088 \times 1^1/_2}{3{,}1416} \cdot \frac{2}{2^1/_4} \cdot \frac{2000 + 3}{3} \sin 6^0 = 581 \text{ Meter.}$$

§. 162. **Besondere Wirkungen des Stosses.** — Wir haben gesehen, dass sich, wenn ein Körper auf einen andern stösst, die Bewegung den Molekülen des zweiten Körpers nur nach und nach mittheilt, und dass daraus eine Gestaltsveränderung dieses Körpers hervorgeht. Wenn der Stoss nur schwach ist, so ist es möglich, dass die Gestaltsveränderung die Elasticitätsgrenze nicht überschreitet, und dann nimmt der Körper nach dem Stoss genau die Gestalt wieder an, welche er vorher hatte. Wenn aber der Stoss heftiger ist, so kann er eine bleibende Gestaltsveränderung, sogar einen Bruch hervorbringen. Dies trifft allemal dann ein, wenn die ersten Moleküle, welche die Wirkung des Stosses erfahren, plötzlich eine schnelle Bewegung erhalten, welche sie bedeutend von ihrer Gleichgewichtslage entfernt, ohne dass Zeit vorhanden war, die Bewegung auf die benachbarten Moleküle zu übertragen. Man sieht daraus, dass je nach der grösseren oder geringeren Geschwindigkeit, mit welcher die Körper auf einander stossen, sehr verschiedene Erscheinungen stattfinden können; einige Beispiele werden genügen, dies ausser Zweifel zu setzen.

Denken wir uns, dass eine gewöhnliche Thüre geöffnet sei und durch Nichts gehindert werde, sich frei um ihre Angeln zu drehen. Wenn man eine Kugel mit der Hand gegen dieselbe wirft, so wird dadurch ein Stoss hervorgebracht, in Folge dessen die Thüre in Bewegung gesetzt wird, ohne eine sehr merkliche Gestaltsveränderung zu erfahren. Wenn dagegen die Kugel aus einer Kanone gegen die Thüre losgeschossen würde, so würde sie dieselbe durchdringen, ohne sie zu drehen, indem sie nur diejenigen Theile derselben mit sich fortreissen würde, welche unmittelbar auf ihrem Wege liegen. Die Moleküle, welche dem Stosse direkt ausgesetzt waren, würden plötzlich eine solche Geschwindigkeit annehmen, dass sie sich von den benachbarten Molekülen schon entfernt haben würden, bevor sich die Bewegung der ganzen Thüre hätte mittheilen können.

Eine Bleikugel, welche man leicht gegen eine Fensterscheibe wirft, prallt von derselben zurück, ohne sie zu zerbrechen. Wenn man sie aber, immer noch mit der Hand, stärker gegen die Scheibe wirft, so durchdringt sie dieselbe, indem sie zugleich eine grosse Menge von Sprüngen hervorbringt, welche strahlenförmig von dem Loche ausgehen, durch welches sie hindurchgegangen ist. Wenn aber die Kugel mittelst einer Feuerwaffe durch das Fenster geschossen wird, so macht sie in die Scheibe nur ein kleines rundes Loch, durch welches sie hindurchgeht; die ganze übrige Scheibe bleibt unversehrt.

Wenn eine Kanonenkugel in schiefer Richtung durch ein eisernes Gitter hindurchgeht, sodass sie auf ihrem Wege mehreren Stäben begegnet, so werden dabei Stösse von verschiedener Wirkung hervorgebracht. Die Fig. 257 soll zeigen, was man beobachtet, wenn die Kugel blos zweien Stäben begegnet. Der erste, welchen sie trifft, ist, wie vorhin die Glasscheibe, einfach durchbrochen, ohne dass seine übrigen Theile eine Gestaltsveränderung erfahren haben. Dies ist aber bei dem zweiten Stabe nicht mehr so; er wird wohl auch durchbrochen, aber die zunächst anliegenden Theile sind im Sinne der Bewegung gekrümmt. Die Kugel, deren Geschwindigkeit durch die Begegnung mit dem ersten Stabe schon vermindert worden ist, kann gegen den zweiten keinen so heftigen Stoss mehr ausüben; während dieses Stosses hat folglich die Bewegung Zeit, sich einer grössern Länge des Stabes mitzutheilen, und dadurch wird die Krümmung der nicht abgerissenen Theile hervorgebracht.

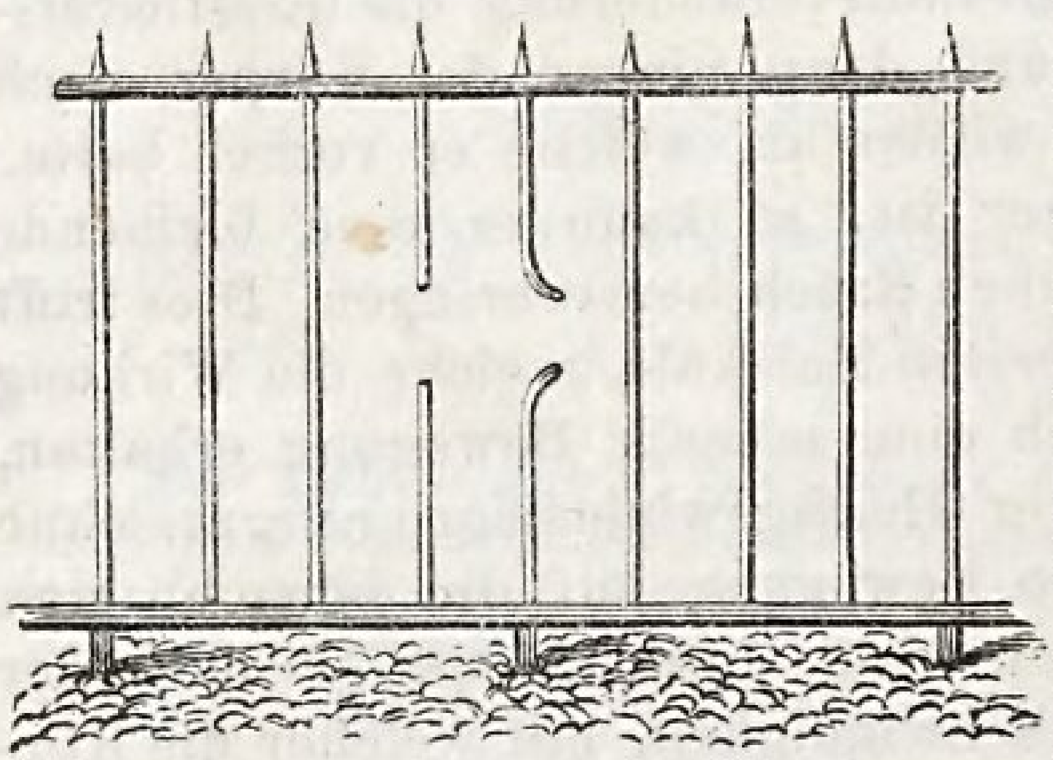


Fig. 257.

§. 163. Die Wirkung, welche durch einen Stoss hervorgebracht wird, hängt auch von der Masse des Körpers ab, welcher den Stoss empfängt. Offenbar gibt der gestossene Körper um so leichter der Wirkung des Stosses nach, je geringer seine Masse ist; und nur bei beträchtlicher Masse des gestossenen Körpers weicht derselbe so schwer aus, dass ein Losreissen oder Zerreissen der Theile desselben, welche direct vom Stoss getroffen werden, daraus entstehen kann.

Wenn man in eine dünne Schiene, welche nicht unterstützt wird, einen Nagel einschlagen will (Fig. 258), so biegt sich dieselbe bei jedem Schlage des Hammers zurück, sodass der Nagel nicht eindringen kann. Um den Nagel einzuschlagen, muss man bei jedem Schlag des Hammers ein Stück Holz oder Eisen an die hintere Fläche der Schiene anhalten (Fig. 259). Die Wirksamkeit desselben ist leicht zu erklären. Wenn sich in diesem Fall nämlich die Schiene zurückbiegen will, so muss sie das Stück Holz, welches hinter ihr befindlich ist, mit fortnehmen; ihre Bewegung, die durch dieselbe Kraft wie vorhin hervorgebracht wird, kann also nicht so rasch sein, als wenn das Stück Holz nicht daran Theil nähme, und es findet daher bei jedem Schlag des Hammers eine Gestaltsveränderung der Schiene in den Punkten statt, auf welche der Stoss direkt wirkt, d. h. der Nagel dringt ein. Es kommt bei dieser Operation nicht sowohl darauf an, mittelst des Stückes Holz einen starken Druck auf die hintere Fläche der Schiene auszuüben, sondern es soll nur mit dem-

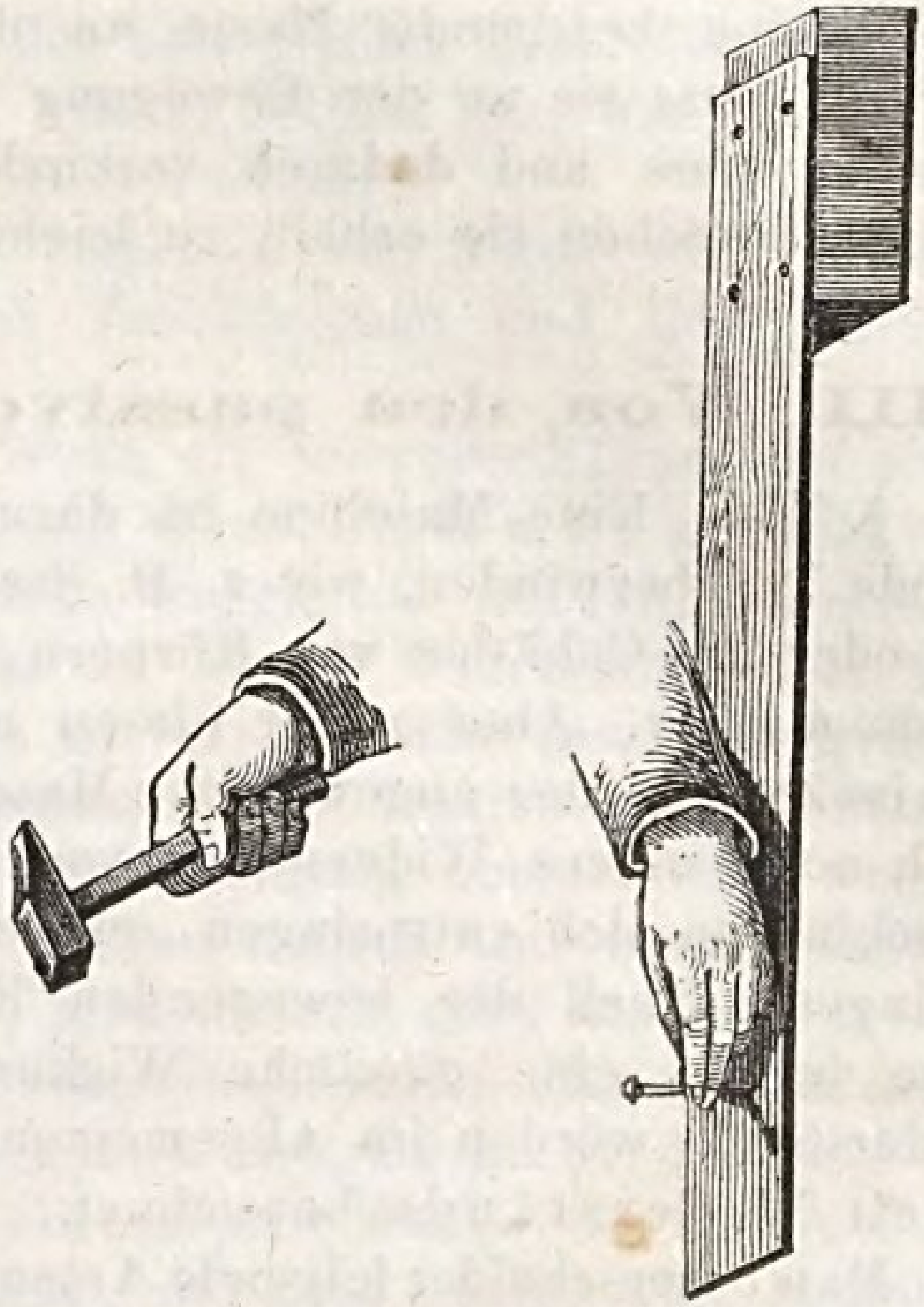


Fig. 258.

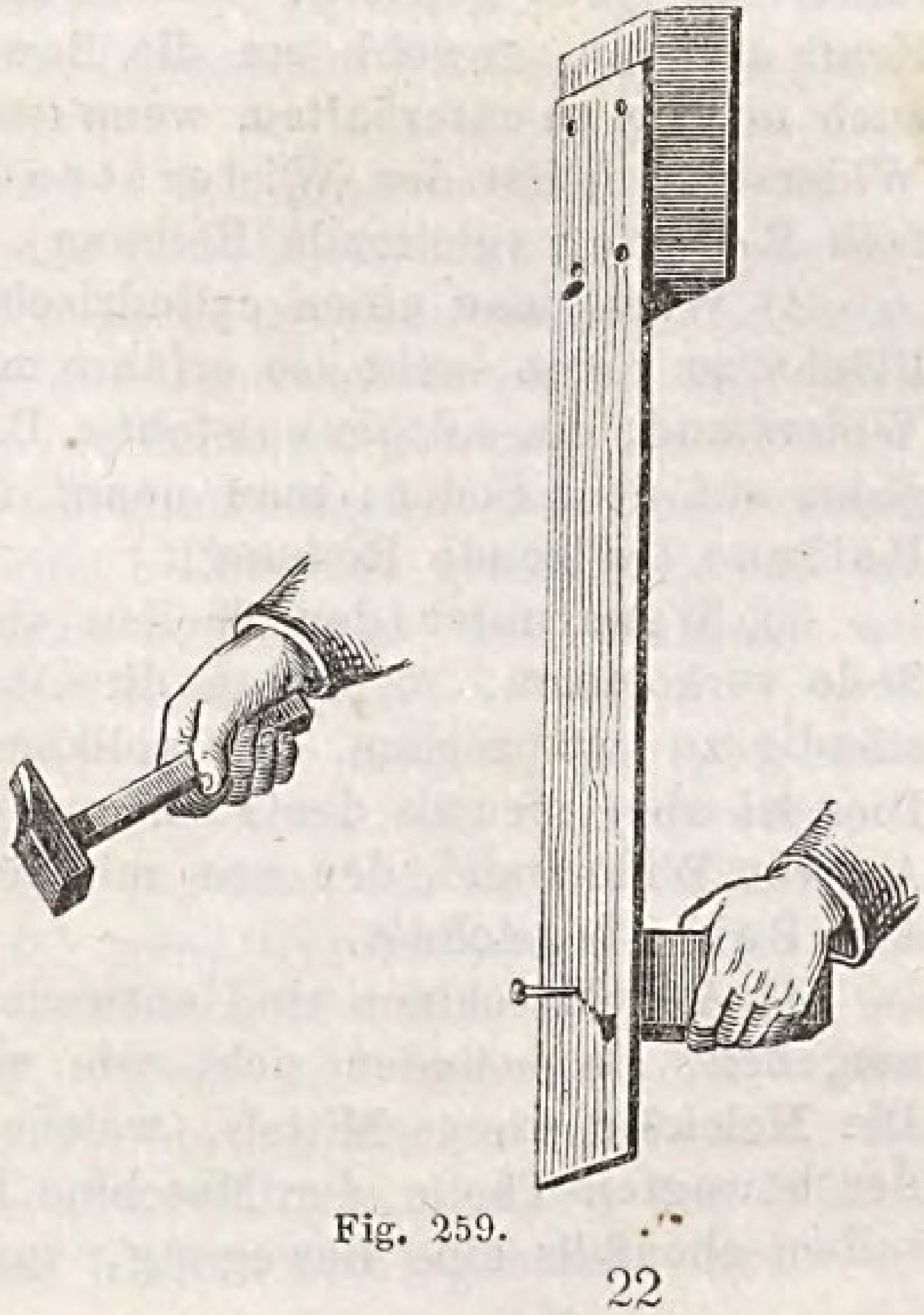


Fig. 259.

selben eine bestimmte Masse an der Schiene so angebracht werden, dass sie an der Bewegung derselben nothwendig Theil nehmen muss und dadurch verhindert, dass die Schiene dem Anstoss, welchen sie erhält, zu leicht Folge leistet.

VIII. Von den passiven Widerständen.

§. 164. Eine Maschine ist dazu bestimmt, gewisse Widerstände zu überwinden, wie z. B. das Gewicht zu hebender Körper oder die Cohäsion von Körpern, welche zerkleinert werden sollen u. s. w. Aber ausser diesen nützlichen Widerständen, die im Zwecke der angewandten Maschine liegen, kommen immer auch noch andere Widerstände vor, die aus der Bewegung der Maschine an sich entspringen und welche einen grösseren oder geringeren Theil der bewegenden Kraft in Anspruch nehmen, ohne irgend eine nützliche Wirkung hervorzubringen. Diese Widerstände werden im Allgemeinen mit dem Namen der passiven Widerstände bezeichnet.

Man unterscheidet folgende Arten von passiven Widerständen:

1) Wenn man es versucht, einen Körper über einen andern wegzuschieben, sodass beide Körper aufeinander gleiten, so erfährt man einen gewissen Widerstand; man muss eine gewisse Kraft ausüben, sowohl um die Bewegung hervorzubringen, als auch um sie zu unterhalten, wenn sie schon vorhanden ist. Dieser Widerstand heisst der Widerstand des Gleitens oder einfach Reibung (gleitende Reibung).

2) Wenn man einen cylindrischen Körper über eine ebene Fläche zu rollen sucht, so erfährt man ebenfalls einen gewissen Widerstand; ein solcher entsteht z. B. bei dem Rollen der Wagenräder auf dem Boden; man nennt ihn den Widerstand des Rollens (wälzende Reibung).

3) Wenn unter den Theilen einer Maschine Schnüre oder Seile vorkommen, so sollten dieselben, um ihrem Zweck vollständig zu entsprechen, eine vollkommene Biegsamkeit besitzen. Dies ist aber niemals der Fall, und daraus entspringt eine neue Art von Widerstand, den man mit dem Namen der Steifigkeit der Seile bezeichnet.

4) Alle Maschinen sind entweder von Luft oder von Wasser umgeben, sie befinden sich, wie man sagt, in einem Mittel. Die Moleküle dieses Mittels, welche sich in der Nachbarschaft der bewegten Theile der Maschine befinden, erhalten von denselben ebenfalls eine Bewegung, welche aber natürlich nur mit

einem Aufwand eines Theils der bewegenden Kraft der Maschine hervorgebracht werden kann. Hierin besteht das, was man unter dem Widerstand des Mittels versteht.

Wir wollen nun diese verschiedenen Arten von passiven Widerständen nach einander durchnehmen und ihre Gesetze angeben.

§. 165. **Reibung.** — Wenn ein schwerer Körper auf einer ebenen, horizontalen Fläche, auf einem Tisch z. B., aufruht, und man will ihn über diese Fläche weggleiten machen, so erfährt man einen gewissen Widerstand. Dieser Widerstand rührt, wie man sieht, von zwei Ursachen her: 1) Von dem Ineinandergreifen der Unebenheiten, der Erhabenheiten und Vertiefungen der beiden Berührungsflächen, die bei der Bewegung übereinander weggehoben, zum Theil abgerissen werden müssen und durch Schleifen und Poliren zwar vermindert, aber niemals ganz beseitigt werden können. 2) Von der Anziehung der beiden Flächen an sich, der Adhäsion, die sich zwischen ihnen geltend macht; diese letztere Ursache ist jedoch in den allermeisten Fällen der Anwendung von ganz unerheblichem Belang, und zwar höchst wahrscheinlich desshalb, weil in Folge einer, zwischen den Berührungsflächen haften bleibenden, wenn auch nur sehr dünnen Luftschichte, jene Adhäsion zu keiner bedeutenden Grösse kommen kann. Wenn freilich durch längeres trockenes Gleiten der Flächen übereinander diese Luftschicht entfernt wird, so beginnt das sog. Anfressen dieser Flächen, welches dieselben in kürzester Zeit zerstört.

Gleichwohl bezeichnet man gewöhnlich kurz als Ursache der Widerstände, die beim Gleiten zu überwinden sind, die Adhäsion und versteht eben darunter die Gesammtheit jener, zum Theil sogar unbekannten Ursachen, welche die Reibung hervorrufen. Diese in Rede stehenden Widerstände werden nur überwunden, wenn man an dem Körper eine hinlänglich grosse Zugkraft anbringt; die Grösse dieser Kraft aber dient eben als Maass des Widerstandes, welchen sie überwunden hat.

Von dem Augenblick an, wo der Körper, der auf einer ebenen Unterlage liegt, anfängt zu gleiten, muss man fortwährend eine gewisse Zugkraft auf ihn ausüben, um ihn in solcher Bewegung zu erhalten, dass sich seine Geschwindigkeit nicht vermindert. Diese Kraft wird wiederum blos dazu angewandt, um die Reibung zu überwinden, welche sich zwischen den beiden übereinander weggleitenden Berührungsflächen entwickelt; sie kann, wie in dem vorhergehenden Fall, zum Maass des Widerstandes dienen, der durch das Gleiten hervorgebracht wird.

Die Zugkraft, welche man in dem ersten Fall anwenden muss, hat nicht immer dieselbe Grösse wie die im zweiten Fall; sie ist häufig grösser. Man muss also zwei verschiedene Arten der Reibung unterscheiden: Die Reibung bei Beginn der Bewegung und die Reibung während der Bewegung. Beide waren der Gegenstand experimenteller Untersuchungen, welche wir nun angeben wollen.

Um die Gesetze der Reibung beim Beginn der Bewegung zu untersuchen, bediente sich *Coulomb* (im Jahre 1781) des Apparats, den Fig. 260 darstellt. Ein Kasten A, welchen man beliebig mit Gewichten belasten kann, ruht auf zwei neben einander liegenden horizontalen Schienen B, über welche er weggleiten kann. An dem Kasten ist eine Schnur befestigt, welche zuerst über eine Rolle C und dann vertikal abwärts geht, um sich in einer Schale D zu endigen. Nachdem man den Kasten A belastet hat, darf man nur in die Schale D so viele Gewichte legen, dass der Kasten eben anfängt sich zu bewegen; die in die Schale gelegten Gewichte, vermehrt um das Gewicht der Schale selbst, sind dann offenbar das Maass der Zugkraft, welche den Kasten in Bewegung setzte, und folglich auch das Maass der Reibung, welche beim Beginn der Bewegung zu überwinden war. Man sieht, dass man bei diesen Versuchen folgende Verhältnisse beliebig abändern kann: 1) die Belastung des Kastens; 2) die Natur der sich reibenden Flächen, indem man sowohl die Schiene, als auch die untere Fläche des Kastens mit Platten von den verschiedenen Körpern belegt, die man dem Versuch unterwerfen will; 3) endlich die Grösse der sich reibenden Flächen, indem man die Breite der Belegungen der Schienen bald mehr, bald weniger gross macht.

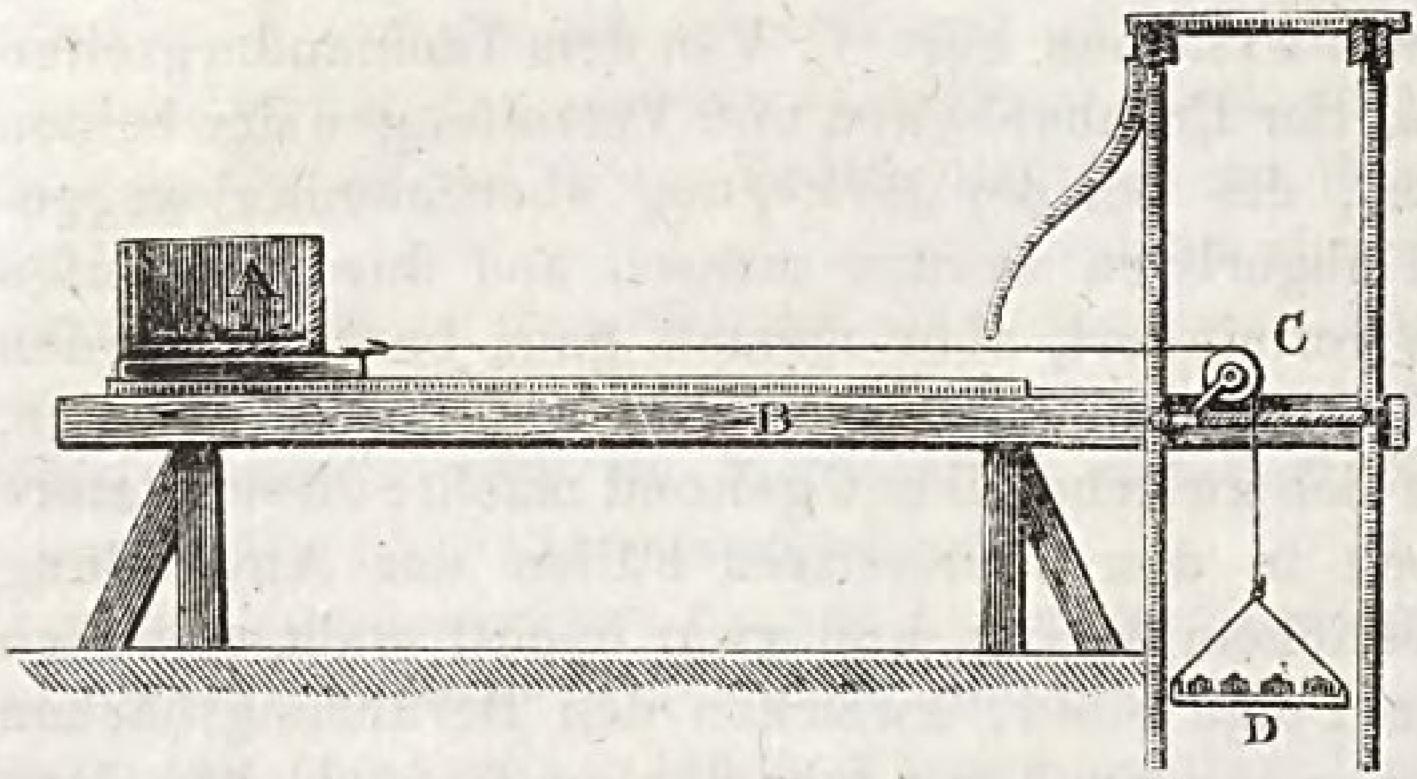


Fig. 260.

Desselben Apparats hat sich *Coulomb* auch bedient, um die Gesetze der Reibung während der Bewegung zu untersuchen. Aber in diesem Fall bietet die Bestimmung der Grösse der Reibung grössere Schwierigkeiten dar; es muss die Bewegung des

Kastens von dem Moment an, wo sie beginnt, beobachtet werden, um ihre Gesetze zu bestimmen. Die Mittel, welche *Coulomb* dazu anwandte, ermangelten jedoch der Genauigkeit, und desshalb waren auch die Gesetze der Reibung, welche er aus seinen Versuchen folgerte, nur unvollkommen erwiesen.

Im Jahre 1831 nahm *Morin* die Versuche *Coulomb's* wieder auf, um sie in grösserem Maassstab und mit grösserer Genauigkeit wieder anzustellen. Er untersuchte dabei sowohl die Gesetze der Reibung beim Beginn der Bewegung, als auch diejenigen der Reibung während der Bewegung, aber es kam ihm besonders darauf an, die letzteren ausser Zweifel zu setzen. Die Hilfsmittel, welche er zu diesem Zwecke anwandte, waren viel genauer als diejenigen, welche *Coulomb* gebrauchte; wir wollen sie zunächst näher beschreiben.

Die Schwierigkeiten, welche die Untersuchungen über die Reibung während der Bewegung darbieten, bestehen, wie wir schon gesagt haben, darin, die Gesetze der Bewegung zu beobachten, welche durch die in die Wagschale D (Fig. 260) gelegten Gewichte hervorgebracht wird. Um dazu zu gelangen, befestigte *Morin* an der Achse der Rolle C eine grössere Scheibe E von Kupfer (Fig. 261), welche sich zu gleicher Zeit mit der Rolle herumdrehen musste: er durfte dann offenbar nur die Gesetze der Bewegung dieser Scheibe untersuchen, um daraus auf diejenigen der Bewegung der Schnur, sowie des Kastens A schliessen zu können. Zu dem Ende war die Scheibe mit einem Blatt Papier bedeckt und vor ihr ein Uhrwerk angebracht, welches einen mit Tusch getränkten Pinsel, dessen Spitze leicht gegen die Oberfläche des Papiers angedrückt war (Fig. 261), in gleichförmige Rotation versetzte. Wenn der Kasten A unbeweglich bleibt und das Uhrwerk den Pinsel bewegt, so ist klar, dass derselbe auf der ruhenden Scheibe den Umfang eines Kreises beschreibt. Aber wenn der Kasten A in Bewegung ist und sich in Folge dessen die Scheibe dreht, so beschreibt der Pinsel, welcher durch das Uhrwerk bewegt wird, keinen Kreis mehr, sondern eine gewisse krumme Linie, deren Gestalt von der Bewegung des Pendels und derjenigen der Scheibe zugleich abhängt. Da aber die Bewegung des Pinsels bekannt ist, so ist klar, dass die Form jener krummen Linie die Bewegung der Scheibe kennen lehren muss; dies wird durch folgende einfache Betrachtung sogleich näher einleuchten.

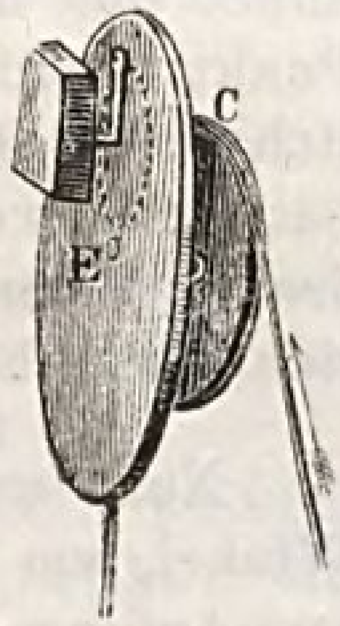


Fig. 261.

Es sei ABC (Fig. 262) die auf der Scheibe von dem Pinsel gezogene Curve und Abc der Kreis, welchen der Pinsel beschrieben haben würde, wenn die Scheibe nicht in Bewegung gesetzt worden wäre. Die Bögen, welche der Pinsel bei seiner gleichförmigen Rotationsbewegung in den auf einander folgenden Secunden beschreibt, seien Ab, bc ... Am Anfange der Bewegung der Scheibe befinde sich die Spitze des Pinsels in A. Am Ende der ersten Secunde sei dieselbe nach b gekommen, aber auf der in Bewegung befindlichen Scheibe habe sie den Punkt B markirt, so musste derselbe offenbar in der ersten Secunde von B nach b gekommen sein, indem er den Kreisbogen Bb um O beschrieben hat. Die Scheibe hat sich also während der ersten Secunde um den Winkel bOB gedreht. Am Ende der zweiten Secunde befindet sich die Pinselspitze in c; wenn also zu dieser Zeit der Punkt C auf der Scheibe von ihr markirt worden ist, so musste sich derselbe in diesem Augenblick in c befinden, d. h. die Scheibe hat sich in den zwei ersten Secunden um den Winkel cOC gedreht. Indem man so fortfährt, erhält man die Winkel, um welche sich die Scheibe in 3, 4 Secunden gedreht hat.

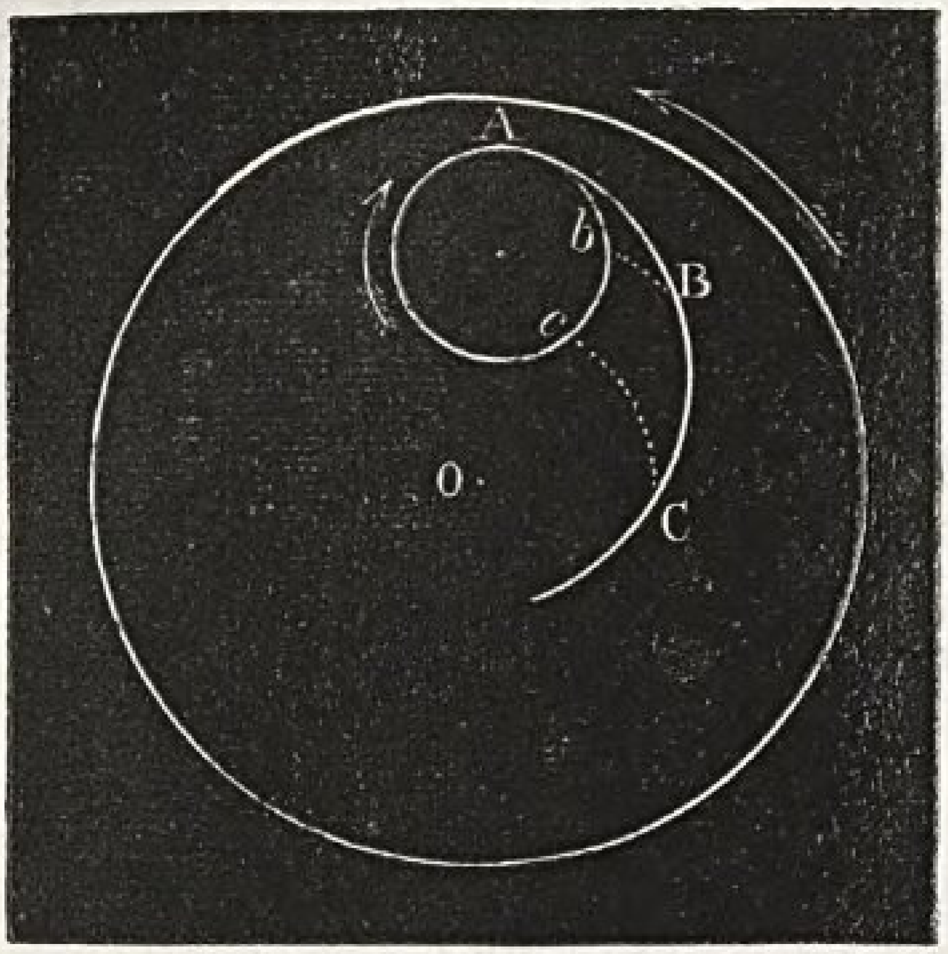


Fig. 262.

Nun fand *Morin* aus allen seinen Versuchen, dass sich die Winkel, um welche sich die Scheibe in 1, 2, 3 Secunden, vom Anfang der Bewegung an gerechnet, drehte, wie die Zahlen 1, 4, 9 verhielten, d. h. dass sie proportional dem Quadrate der Zeiten waren, in welchen sie beschrieben wurden. Die Wege also, welche in denselben Zeitintervallen von dem Kasten A durchlaufen wurden, waren ebenfalls dem Quadrat dieser Zeiten proportional, oder die Bewegung des Kastens A war von derselben Art, wie die eines freifallenden Körpers, es war eine gleichförmig beschleunigte Bewegung (§. 113). Der Winkel, welchen die Scheibe während der ersten Secunde beschrieb, gab die Grösse des Weges, welcher in derselben Zeit von dem Kasten durchlaufen wurde, und das Doppelte dieses Weges war die Beschleunigung jener gleichförmig beschleunigten Bewegung.

Die Kraft, welche die Bewegung des Kastens hervorbringt, ist das Gewicht der Wagschale D und dessen, was sie enthält; aber diese Kraft wird theilweise durch die Reibung aufgehoben, welche der Kasten bei seiner Bewegung zu überwinden hat; der übrig bleibende Theil erst veranlasst die Beschleunigung, und da sich diese Beschleunigung während der ganzen Dauer der Bewegung als gleich gross ergeben hat, so folgt, dass der Ueberschuss der bewegenden Kraft (das Gewicht in der Wagschale nebst dem Gewicht der Schale selbst) über die Reibung des Kastens während der ganzen Bewegung gleiche Grösse behält. Es bleibt also auch die Reibung während der ganzen Dauer der Bewegung immer gleichgross.

Um die Grösse der Reibung zu finden, wird man beachten, dass der Versuch die Beschleunigung der stattfindenden Bewegung kennen lehrt. Aus dieser Beschleunigung und aus der Masse der Wagschale nebst der in ihr liegenden Gewichte, sowie aus der Masse des Kastens A mit seiner Belastung und dem Trägheitsmoment der Scheibe und Rolle ergibt sich aber leicht (nach §. 122 und §. 146) die Grösse der Kraft, welche jene Beschleunigung hervorbrachte. Diese Kraft von der ganzen bewegenden Kraft, d. h. den Gewichten in der Schale D nebst deren eigenem Gewicht, abgezogen, gibt die Grösse der Reibung, welche der Kasten A zu überwinden hat.

§. **166.** Durch Vergleichung der Resultate einer grossen Anzahl von Versuchen gelangte *Morin* dazu, folgende, schon von *Coulomb* gegebene Gesetze als vollkommen erwiesen aufzustellen:

Die zwischen zwei bestimmten Körpern stattfindende Reibung während der Bewegung ist

1) proportional dem Druck, welchen die beiden sich reibenden Körper senkrecht zu ihrer Berührungsfläche auf einander ausüben;

2) unabhängig von der Grösse der Berührungsflächen;

3) unabhängig von der Geschwindigkeit der Bewegung.

Die zwischen zwei bestimmten Körpern stattfindende Reibung beim Beginn der Bewegung ist ebenso

1) proportional dem Druck;

2) unabhängig von der Grösse der Berührungsflächen.

Wenn die aufeinander gleitenden Körper hart sind, wie Steine und Metalle, so ist die Reibung während der Bewegung

dieselbe wie die beim Beginn. Für weichere, leichter zusammendrückbare Körper dagegen, wie z. B. für Holz, ist die Reibung beim Beginn der Bewegung beträchtlich grösser als während derselben. Ja es ist der Widerstand, welchen man erfährt, wenn man zwei Körper, von denen wenigstens der eine weicher und zusammendrückbarer ist, aufeinander legt und sie dann übereinander weggleiten zu machen sucht, gar nicht einmal immer derselbe; er verändert sich, je nachdem die Dauer der Berührung vor dem Beginn des Gleitens mehr oder weniger lang war. Bei dem Gleiten von Holz auf Holz erreicht die Reibung beim Beginn der Bewegung ihr Maximum erst, nachdem die Berührung vorher zwei bis drei Minuten gedauert hat. Beim Gleiten von Holz auf Metall ist diese Zeit noch viel länger; sie kann hier selbst mehrere Tage betragen. Wenn aber einmal der Contakt beider Körper hinreichend lange gedauert hat, so vermehrt sich bei noch längerer Dauer desselben die Reibung beim Beginn der Bewegung nicht mehr.

Es kann auf den ersten Anblick sonderbar erscheinen, dass die Reibung, sowohl die beim Beginn, als die während der Bewegung, von der Grösse der reibenden Oberflächen unabhängig ist; es scheint im Gegentheil, dass sie proportional diesen Oberflächen sein sollte; aber wir können uns durch eine sehr einfache Schlussfolgerung Rechenschaft über jenes Resultat geben, welches aus den Versuchen gefolgert werden musste. Setzen wir voraus, dass zwei Körper von demselben Gewicht auf einer Horizontalebene liegen, und dass die Berührungsflächen von derselben Natur, aber von verschiedener Grösse, beim ersten etwa doppelt so gross als beim zweiten seien. Wenn man diese beiden Körper über die Ebene weggleiten macht, so wird sich allerdings der erste an doppelt so vielen Punkten reiben als der zweite; aber da sich zugleich sein Gewicht über doppelt so viel Unterstützungspunkte vertheilt, so kann man den Druck, welcher an jedem dieser Punkte hervorgebracht wird, nur als halb so gross annehmen als derjenige ist, welcher an jedem Punkt der Unterstützungsfläche des zweiten Körpers ausgeübt wird. Es wird folglich die Reibung an jedem der Unterstützungspunkte des ersten Körpers auch nur halb so gross sein. Wenn folglich auch die Zahl der reibenden Punkte mit der Grösse der Berührungsfläche wächst, so wird doch die Reibung in jedem dieser Punkte in demselben Verhältniss kleiner, sodass die Gesammtreibung von der Grösse der Berührungsfläche unabhängig sein muss.

§. 167. Da die Grösse der Reibung zwischen zwei bestimmten Körpern dem Drucke proportional ist, den dieselben senkrecht gegen ihre Berührungsflächen auf einander ausüben, so kann sie dadurch erhalten werden, dass man jenen Druck mit einem bestimmten Factor multiplicirt, den man den Reibungscoëfficienten zwischen den beiden Körpern nennt. Dieser Reibungscoëfficient ist also für je zwei Körper, so lange ihre Berührungsflächen die gleiche Beschaffenheit behalten, immer derselbe; dagegen ist er bei verschiedenen Körpern oder auch nur bei verschiedener Beschaffenheit ihrer Oberflächen, ob dieselben rauher oder glatter sind, ob ein Schmiermittel dazwischen gebracht wurde oder nicht, sehr verschieden. Die folgende Tabelle gibt die Reibungscoëfficienten für einige in der Anwendung wichtige Fälle.

Tab. 10. Reibungscoëfficienten für gleitende Reibung.

Bezeichnung der Natur der Berührungsflächen.	Coëfficienten der Reibung: beim Beginn der Bewegung.	Coëfficienten der Reibung: während der Bewegung.
Holz auf Holz, ungeschmiert, im Mittel	0,50	0,36
„ „ „ mit Seife geschmiert, do.	0,36	0,14
„ „ „ „ Talg „ do.	0,19	0,07
„ „ Metall, ungeschmiert, do.	0,60	0,42
„ „ „ mit Talg geschmiert, do.	0,12	0,08
Lederriemen auf Holz, ungeschmiert, do.	0,63	0,45
„ „ „ mit Wasser benetzt, do.	0,87	0,33
Metall auf Metall, ungeschmiert, do.	0,18	0,18
„ „ „ mit Oel geschm., do.	0,12	0,07

Bei der Bewegung von Zapfen in ihren Lagern oder Pfannen macht sich ein Widerstand geltend, der, wie man sogleich sieht, von der gewöhnlichen Reibung nur dadurch verschieden ist, dass die Berührungsstelle bei dem einen der beiden sich reibenden Körper nahezu stets dieselbe bleibt. Man nennt diesen Widerstand Zapfenreibung, aber es ist klar, dass auf ihn alles anwendbar sein muss, was bisher über die Reibung gesagt worden ist. Da jedoch dieser Fall in den Anwendungen so überaus wichtig

ist, so hat man die Reibungscoëfficienten für denselben auch direkt bestimmt, indem man die Kraft maass, welche zur Ueberwindung der Reibung an einer Welle, deren Zapfen und Lager aus dem zu untersuchenden Material bestanden, erforderlich war. Folgende Tabelle enthält einige Resultate dieser Untersuchungen.

Tab. 11. Reibungscoëfficienten für Zapfenreibung.

Bezeichnung der Natur der Berührungsflächen.	Coëfficienten der Reibung während der Bewegung.			
	Trocken.	Mit Wasser benetzt.	Mit Fett geschmiert: wie gewöhnlich	Mit Fett geschmiert: gut unterhalten.
Bronze auf Bronze	—	—	0,097	—
Gusseisen „ „	—	—	—	0,049
Schmiedeisen „	0,251	0,189	0,075	0,054
Gusseisen auf Gusseisen	—	0,137	0,075	0,054
Schmiedeisen auf Gusseisen . .	—	—	0,075	0,054

Man sieht daraus, dass in Lagern, bei denen das Schmieren fortwährend unterhalten wird, die Reibung bedeutend geringer ist, als wenn das Schmieren, wie gewöhnlich, nur von Zeit zu Zeit geschieht. Ausserdem hat man bemerkt, dass in neuen Lagern die Reibung allemal grösser ist als in alten schon ausgelaufenen.

§. 168. **Widerstand des Rollens.** — Wenn man einen cylindrischen Körper über eine ebene, horizontale Fläche fortzurollen sucht, so erfährt man einen Widerstand, der offenbar von der Gestaltsveränderung herrührt, welche der Körper und die ebene Fläche, auf welche er sich stützt, in Folge des Drucks erleiden, der in den Berührungspunkten stattfindet. Der Cylinder plattet sich ab, während sich die Fläche an der Stelle, wo er sie berührt, rinnenförmig einsenkt, und in Folge dessen muss man während des Fortrollens des Körpers denselben so zu sagen jeden Augenblick eine schiefe Ebene hinauf bewegen.

Die ersten genauen Versuche, um die Gesetze der rollenden Reibung zu bestimmen, wurden gleichfalls von *Coulomb* gemacht. Er bediente sich dabei des folgenden Apparates:

Zwei horizontal liegende Bohlen waren so neben einander befestigt, dass sie zwischen sich einen Zwischenraum liessen (Fig. 263); quer über dieselben war eine cylindrische Walze gelegt, und der Druck, welchen dieselbe ausübte, konnte mittelst gleich grosser Gewichte, welche an dünnen Schnüren *a* über sie gehängt wurden, nach Belieben vermehrt werden. Ungefähr in der Mitte der Welle war eine Schnur *b* mehrmals um sie herumgewickelt und endigte sich in eine Waagschale *c*, in welche man verschiedene Gewichte legen konnte. Bei jedem Versuch wurden in diese Waagschale gerade so viele Gewichte gelegt als nöthig waren, um das Rollen der Walze zu veranlassen. Diese Gewichte konnten offenbar als Maass für den Widerstand des Rollens dienen.

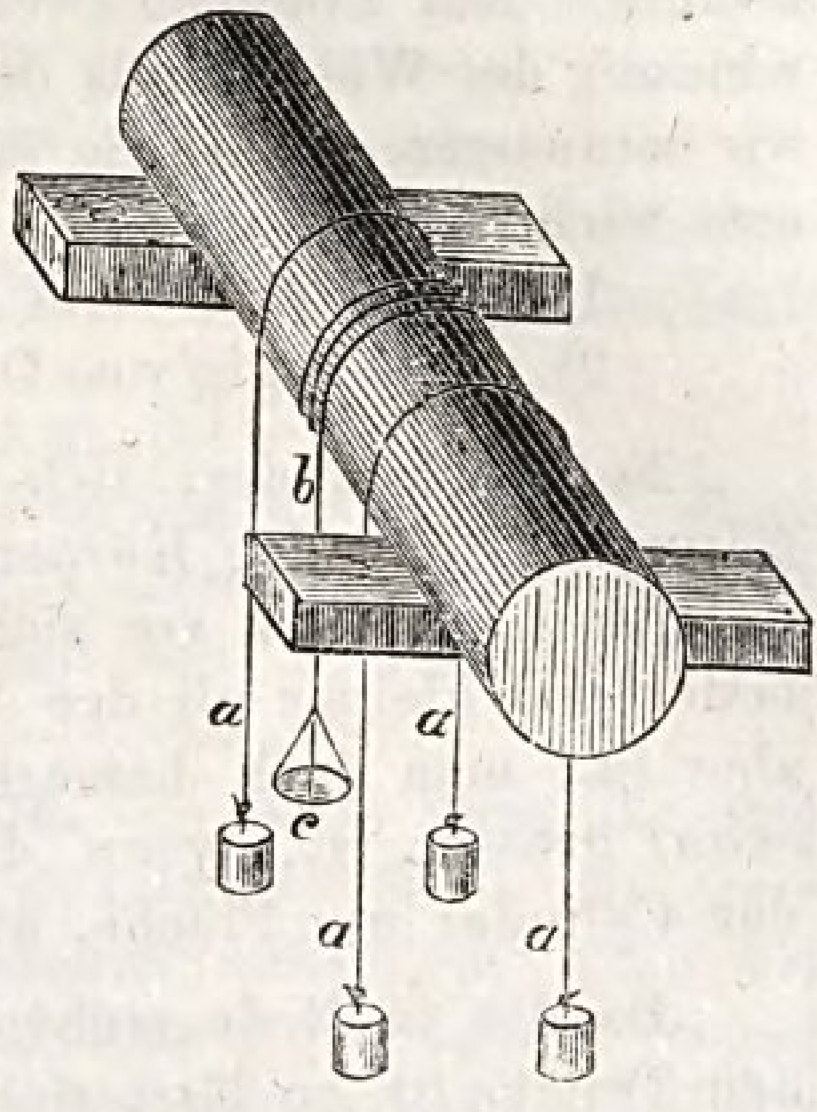


Fig. 263.

Während einer sehr kurzen Zeit der Bewegung kann man den rollenden Körper so betrachten, als wenn er sich um die gerade Linie drehte, in welcher er aufliegt. Der Widerstand, mit dem wir uns beschäftigen, setzt sich dieser Drehung entgegen, sodass dieselbe nicht eher eintreten kann, als bis die Kraft P (Fig. 264) so gross ist, dass sie diesem Widerstand das Gleichgewicht halten kann. Dabei wirkt, wie man sieht, die Kraft P an dem Hebelarm AB. Man kann aber das Experiment auch anders anstellen, indem man das Gewicht P durch ein anderes Q ersetzt, welches in dem Punkt C horizontal an der Walze zieht, indem die Schnur, an welcher es befestigt ist, über eine Leitrolle geht. Es ist klar, dass dieses letztere Gewicht, welches auf einen Hebelarm AC wirkt, der doppelt so gross als AB ist, nur halb so gross als P sein darf, um die Walze in Bewegung zu setzen. Eine Kraft, welche auf einen andern Hebelarm als AB oder AC wirken und demselben Widerstand des Rollens das Gleichgewicht halten sollte,

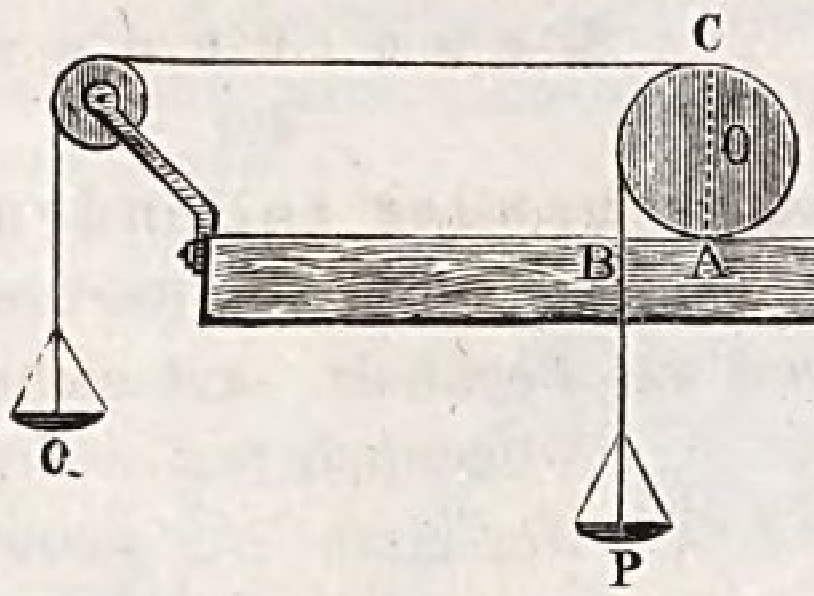


Fig. 264.

müsste natürlich einen von P und Q verschiedenen Werth haben, der von der Grösse seines Hebelarms abhängt und nach dem Hebelgesetze aus einer von jenen leicht gefunden werden könnte. Aus *Coulomb's* Versuchen folgt, dass die zur Ueberwindung des Widerstands des Rollens nöthige Kraft, von welcher wir voraussetzen, dass sie immer auf einen und denselben Hebelarm wirkt,

1) proportional dem Druck,
2) unabhängig vom Durchmesser des rollenden Cylinders ist.

Natürlich ändert sich der Widerstand des Rollens mit der Natur des rollenden Körpers und mit der Natur der Fläche, auf welcher das Rollen vor sich geht; er ist aber in allen Fällen bedeutend kleiner als der Widerstand der Reibung. Ausserdem aber hat man noch bemerkt, dass der Widerstand des Rollens etwas grösser ist, wenn die Linie kürzer wird, nach welcher der Cylinder die Fläche, auf welcher er rollt, berührt.

Da der in Rede stehende Widerstand ebenfalls proportional dem Drucke ist, so lässt sich auch von einem Reibungscoëfficienten für wälzende Reibung sprechen. Folgende kleine Tabelle gibt einige derselben für die wichtigsten vorkommenden Fälle, unter der Voraussetzung, dass die Kraft zur Fortbewegung einen Hebelarm von 1 Centimeter in Bezug auf die Berührungslinie des wälzenden Cylinders erhält.

Tab. 12. Reibungscoëfficienten für wälzende Reibung.

Bezeichnung der auf einander rollenden Körper.	Reibungs-Coëfficient.
Walzen aus Pockholz auf eichener Unterlage	0,047
„ „ Ulmenholz „ „ „	0,081
„ „ Gusseisen „ gusseiserner „	0,047
„ „ „ „ eisernen Schienen	0,052

Wenn die Kraft, welche das Rollen veranlasst, anstatt immer auf den nämlichen Hebelarm zu wirken, in allen Fällen im Mittelpunkt des rollenden Cylinders, wie bei den Wagenrädern, oder auch an dem oberen Ende seines vertikalen Durchmessers angreift, so ist wohl klar, dass sie diesem Durchmesser umgekehrt proportional ist.

Beispiel: Ein Eisenbahnwagenrad von 1 Meter Durchmesser sei mit 2000^{k} belastet. Welche Kraft, in seiner Achse wirkend, ist nöthig, um die wälzende Reibung zu überwinden? — Nach vorstehender Tabelle muss die an einem Hebelarm von 1 Centimeter Länge wirkende Kraft das 0,052fache der Last sein, um den Widerstand des Rollens zu überwinden. Im gegebenen Fall aber wirkt die Kraft an einem Hebelarm von 50 Centimeter Länge, kann also 50mal so klein sein. Die gesuchte Kraft ist folglich

$$2000 \times 0{,}052 : 50 = 2{,}1^{k}.$$

Dazu kommt freilich dann noch die Reibung der Achse in ihren Lagern. — Wenn das Rad, ohne sich zu drehen, über die Schiene schleifen müsste, so wäre dazu nach Tab. 10 eine Kraft von $2000 \times 0{,}18 = 360^{k}$ erforderlich.

§. 169. **Steifigkeit der Seile.** — Man kann für den Widerstand, welcher durch die Steifigkeit der Seile hervorgebracht wird, zwei verschiedene Ursachen aufstellen. Zunächst ist klar, dass einem Seil, wenn es auf eine Rolle oder Trommel aufgewickelt werden soll, die hiezu erforderliche Krümmung erst gegeben werden muss; dazu ist aber eine gewisse Kraft erforderlich, welche von der ganzen bewegenden Kraft der Maschine genommen werden muss, ohne eine nützliche Wirkung hervorzubringen. Die zweite Ursache für den durch die Seilsteifigkeit hervorgebrachten Widerstand ergibt sich, wenn man beachtet, dass sich die Seilstücke zu beiden Seiten der Rolle nicht genau unter denselben Umständen befinden. Das Stück, welches sich aufrollt, nimmt nicht plötzlich die Krümmung der Rolle an; es erhält diese Krümmung erst nach und nach. Ausserdem schiebt sich dieser Theil des Seils mit immer neuen Stellen an die Rolle an, wodurch in Folge der starken Pressung, welche die aufzuziehende Last ausübt, Theilchen an seiner Oberfläche etwas zur Seite rücken und einen Wulst bilden (Fig. 265), durch den das Seil etwas auf die Seite geschoben wird. Durch diesen wie durch den vorhin angegebenen Umstand wird aber offenbar der Hebelarm der zu überwindenden Last vergrössert, und da dies auf Seite der Kraft wenigstens nicht in gleichem Grade der Fall ist, so ist klar, dass die zur Ueberwindung der

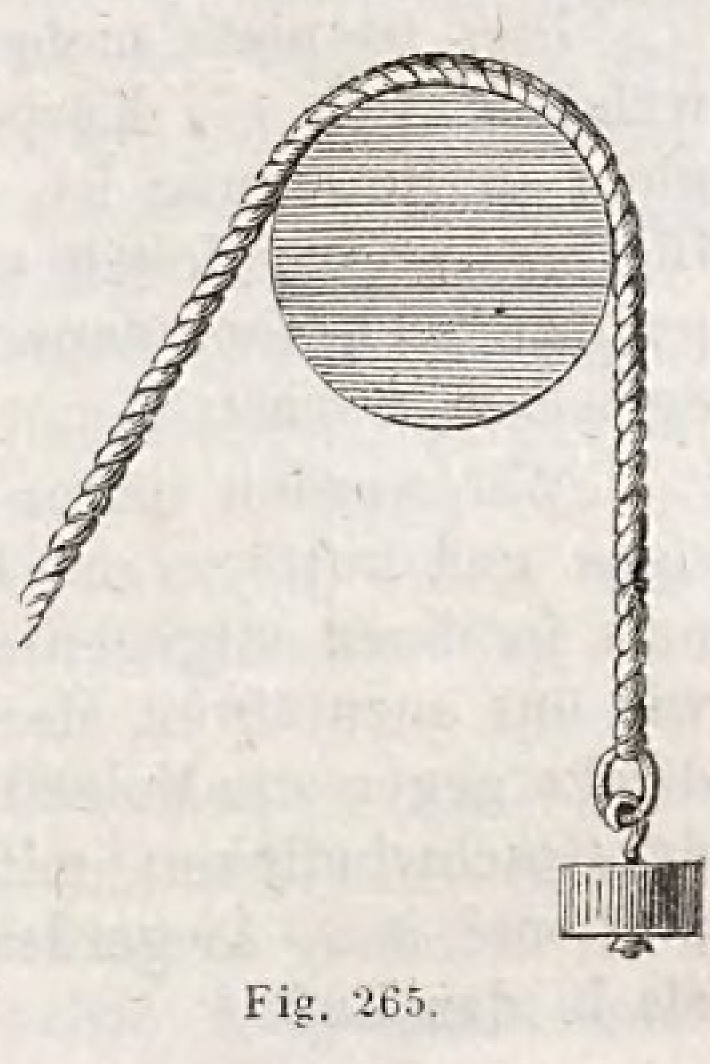


Fig. 265.

Last nöthige Kraft grösser sein muss, als sie es ohne die Seilsteifigkeit wäre.

Der Theil der bewegenden Kraft, welcher durch die Steifigkeit der Seile absorbirt wird, nimmt mit der Spannung des Seils zu, aber er ist dieser Spannung nicht proportional; er ist ferner um so grösser, je kleiner der Durchmesser der Rolle oder Trommel ist, auf welcher das Seil aufgewickelt wird, und verändert sich ausserdem mit der Dicke und mit der Natur des Seils. Eine merkliche Verschiedenheit zeigt sich namentlich zwischen alten und neuen Seilen in dieser Beziehung.

Bei Riemen ohne Ende, welche über Rollen oder Trommeln gehen, findet eine ähnliche Art von Widerstand statt.

§. 170. **Widerstand des Mittels.** — Wenn sich ein Körper in einem flüssigen oder luftförmigen Mittel bewegt, so erfährt er von Seite dieses Mittels einen Widerstand, welcher fortwährend seine Geschwindigkeit zu vermindern sucht; dies kommt, wie wir schon gesehen haben, daher, dass der Körper den Molekülen des Mittels, welchen er begegnet, seine Bewegung mittheilen muss.

Wenn man diesen Widerstand mit demjenigen vergleicht, welcher durch die Reibung veranlasst wird, so findet man eine wesentliche Verschiedenheit zwischen den beiden. Ein Körper, welchen man über eine Fläche weggleiten zu machen sucht, leistet schon einen Widerstand, bevor noch das Gleiten begonnen hat. Dieser Widerstand besteht noch während des Gleitens; aber er ist dann sehr häufig geringer als vorher und ändert sich nicht mehr mit der Geschwindigkeit des gleitenden Körpers.

Dies ist nicht mehr so bei dem Widerstand des Mittels, in welchem sich ein Körper bewegt. So lange der Körper noch nicht in Bewegung ist, macht sich dieser Widerstand gar nicht fühlbar; er entwickelt sich nur während der Bewegung und vergrössert sich aber dann in dem Maasse, als die Geschwindigkeit derselben wächst.

Wir werden später auf diesen Widerstand, welchen die flüssigen und luftförmigen Körper der Bewegung eines festen Körpers in ihnen entgegensetzen, zurückkommen; für jetzt begnügen wir uns anzuführen, dass er 1) der Grösse der Oberfläche, welche direkt gegen die Moleküle des Mittels stösst, und 2) dem Quadrat der Geschwindigkeit, mit welcher die Bewegung vor sich geht, proportional ist. Ausserdem ist er im Wasser bedeutend grösser als in der Luft.

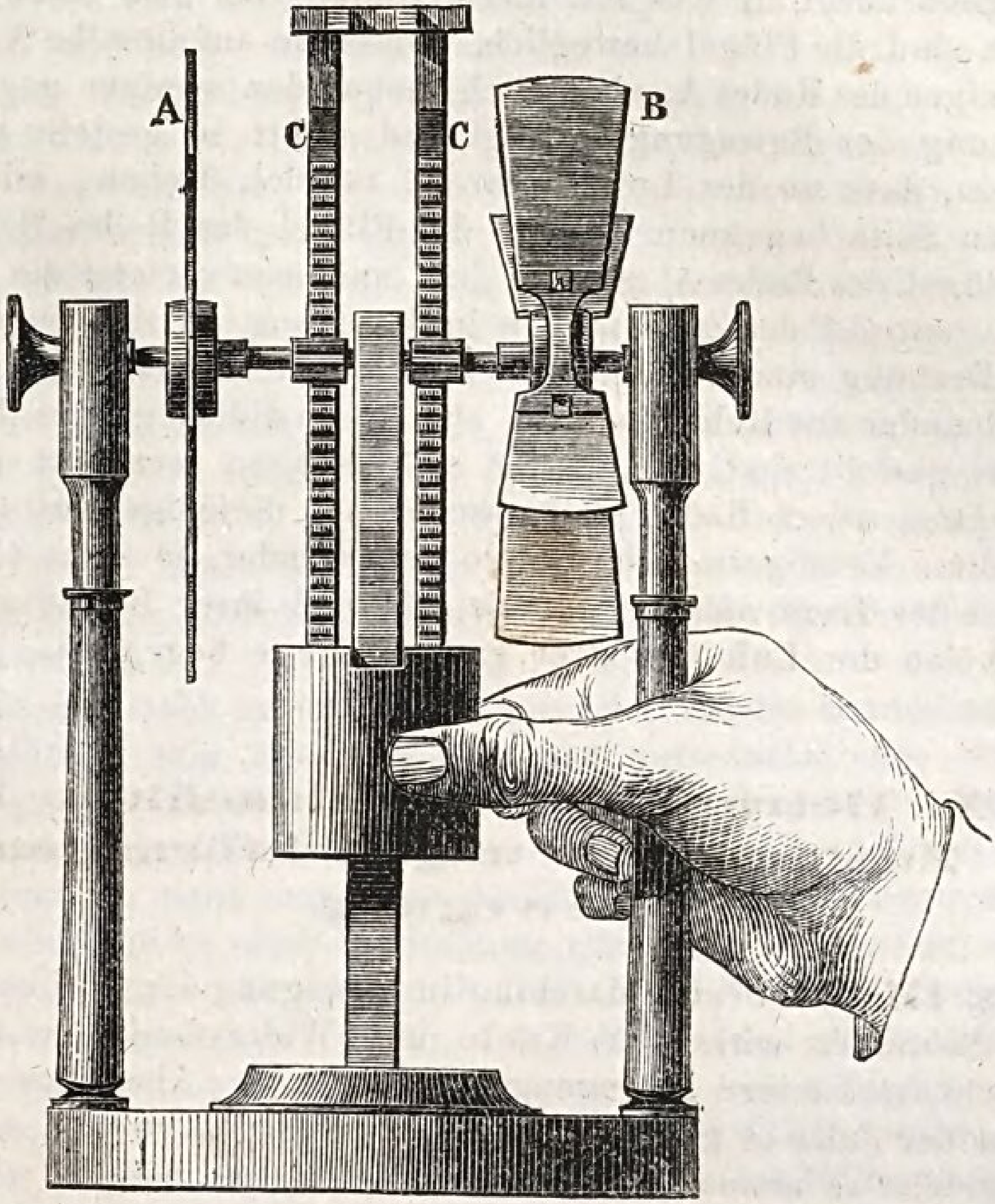


Fig. 266.

Der kleine Apparat, welcher in Fig. 266 abgebildet ist, eignet sich dazu, zu zeigen, dass sich in der That der Widerstand des Mittels mit der Grösse der Oberfläche, welche seinen Molekülen direkt begegnet, vergrössert. Zwei kleine Räder A und B sind jedes auf einer besondern Achse befestigt und um diese Achsen sehr leicht beweglich. Die Bewegung dieser Achsen geschieht mittelst zweier miteinander verbundener Zahnstangen, welche in zwei Triebe von gleicher Grösse eingreifen, die an jenen Achsen befestigt sind. Wenn man diese beiden Zahnstangen, indem man sie so fasst, wie es Fig. 266 zeigt, schnell herabsenkt, bis sie nicht mehr mit den Trieben eingreifen und sich diese in den Ausschnitten CC frei drehen können, so wird dadurch den beiden kleinen Rädern genau dieselbe Rotationsgeschwindigkeit ertheilt. Jedes dieser Rädchen nun wird von vier Flügeln gebildet. Bei dem Rade A sind diese Flügel auf der Achse festgemacht und

begegnen der Luft blos mit ihrem Rande; bei dem Rade B dagegen sind die Flügel beweglich, sodass sie auf dieselbe Art, wie diejenigen des Rades A, aber auch mehr oder weniger gegen die Richtung der Bewegung geneigt und selbst so gestellt werden können, dass sie der Luft, während sie sich drehen, mit ihrer breiten Seite begegnen. Wenn die Flügel des Rades B so wie die Flügel des Rades A gestellt sind, und man versetzt die beiden Räder mittelst der Zahnstangen in Bewegung, so sieht man beide ihre Drehung eine beträchtliche Zeit lang fortsetzen und nahezu mit einander zur Ruhe kommen; aber wenn die Flügel des Rades B anders gestellt sind, wie es Fig. 266 zeigt, so verzögert sich die Bewegung dieses Rades weit rascher als diejenige des andern, und diese Verzögerung ist um so bedeutender, je mehr sich die Flügel der Lage nähern, wo sie während ihrer Bewegung den Molekülen der Luft mit ihrer ganzen Breite begegnen.

IX. Betrachtung der Maschinen im Zustande der ungleichförmigen Bewegung.

§. **171.** Wenn eine Maschine in Bewegung ist, und es halten sich die an ihr wirkenden Kräfte und Widerstände das Gleichgewicht, so ist ihre Bewegung gleichförmig. Aber dies ist nur selten der Fall; es gibt sogar eine grosse Anzahl von Maschinen, für welche es niemals stattfindet; das folgende Beispiel wird dies sogleich näher beleuchten.

Zur Bewegung eines Schleifsteins wendet man gewöhnlich die in Fig. 267 dargestellte Vorrichtung an. Die Achse des Steins endigt sich in einer Kurbel; von dem Ende dieser Kurbel geht eine Treibstange beinahe vertikal herab und ist mit ihrem untersten Theil an dem Ende eines Fusstrittes befestigt. Die Verbindung dieser Treibstange, einerseits mit der Kurbel, andererseits mit dem Tritt ist so hergestellt, dass sie um die Verbindungspunkte beweglich ist. Wenn man den Schleifstein direkt mit der Hand in Umdrehung versetzt, so sieht man

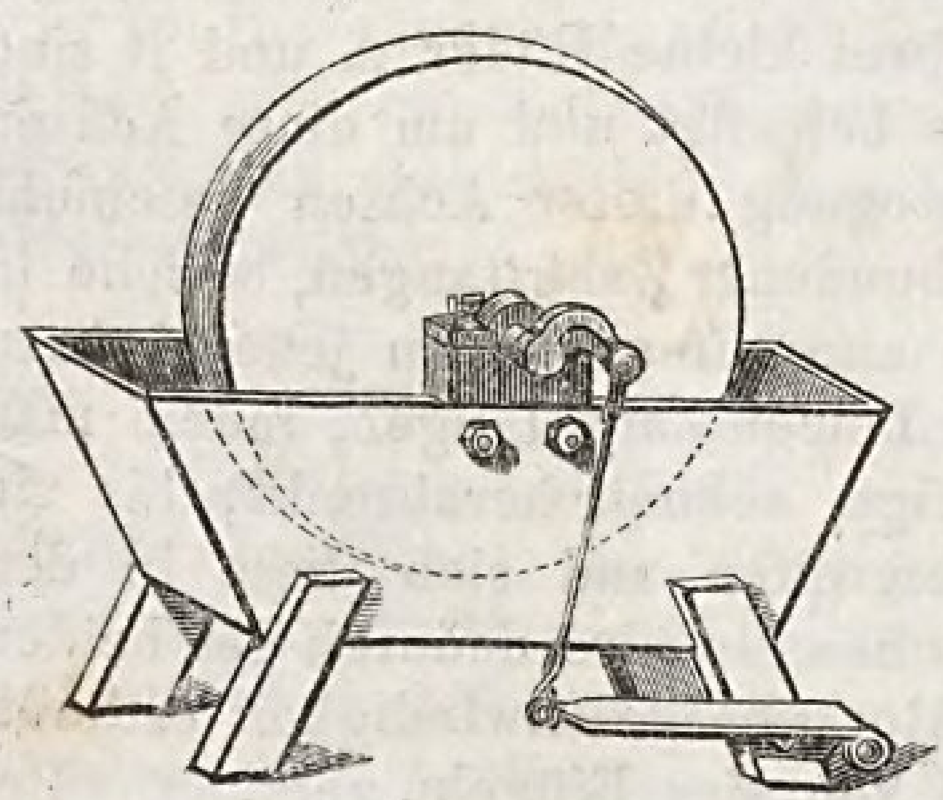


Fig. 267.

die Kurbel sich drehen; die Treibstange geht abwechselnd auf und ab und neigt sich bald auf die eine, bald auf die andere Seite der Vertikalen; der Tritt endlich wird sich, indem er sich um das eine seiner Enden dreht, abwechselnd heben und senken. Wenn der Schleifer, welcher sich eines solchen Steins bedient, denselben in Bewegung setzen und darin erhalten will, so setzt er einen Fuss auf den Tritt und drückt denselben in dem Moment nieder, wo die Treibstange abwärts zu gehen beginnt; mit diesem Druck fährt er fort, bis sie ihre tiefste Stelle erreicht hat; dann lässt er nach, jedoch ohne den Fuss zurückzuziehen; die Treibstange geht von selber in die Höhe, um darauf wieder niedergedrückt zu werden u. s. f. Zu derselben Zeit, in welcher der Schleifer auf diese Weise die Bewegung des Steins unterhält, drückt er den zu schleifenden Körper gegen die Oberfläche des Schleifsteins.

Es ist leicht zu erkennen, dass eine solche Bewegung nicht gleichförmig sein kann. Wenn man untersucht, was während einer ganzen Umdrehung des Steins vor sich geht, indem man mit dem Augenblick beginnt, wo der Tritt seine höchste Stelle einnimmt, so sieht man, dass der Druck des Fusses nur während der ersten Hälfte einer Umdrehung wirkt, in der ganzen zweiten Hälfte ist dieser Druck gleich Null. Der Widerstand dagegen, welcher hauptsächlich durch die Reibung des zu schleifenden Körpers, sowie durch die Reibung an der Achse des Steins hervorgebracht wird, wirkt nahezu mit gleicher Stärke während der ganzen Umdrehung des Steins. In der zweiten Hälfte jeder Umdrehung kann also schon desshalb zwischen Kraft und Widerstand nicht Gleichgewicht bestehen, weil die Kraft Null ist, der Widerstand aber nicht. In der ersten Hälfte der Bewegung aber existirt dieses Gleichgewicht nur in zwei bestimmten Momenten, wie wir sogleich sehen können.

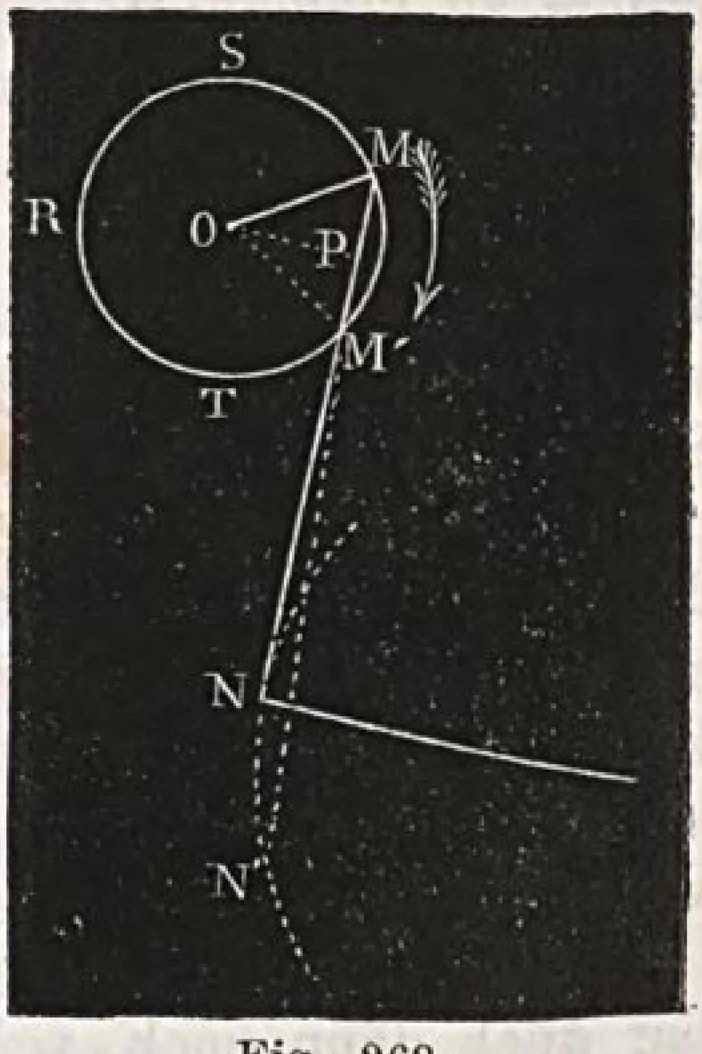


Fig. 268.

Wenn sich der Stein herumdreht, so beschreibt das Ende M (Fig. 268) der Kurbel OM den Umfang eines Kreises. Die Treibstange geht bald zur Rechten, bald zur Linken von dem Punkte O, dem Mittelpunkt jenes Kreises, vorbei. Während der Tritt abwärts geht, befindet sich die Treibstange fortwährend auf der rechten Seite dieses Mittelpunktes, aber

ihre Entfernung OP von diesem Punkt, welche Entfernung nichts anderes als der Hebelarm ist, auf welchen die Kraft wirkt, ändert sich von einem Augenblick zum andern. Dieser Hebelarm, anfangs Null, wenn die Treibstange eben abwärts zu gehen beginnt, vergrössert sich mehr und mehr, bis er gleich der Länge des Kurbelarmes wird; dann nimmt er wieder ab, um wieder Null zu werden, wenn die Treibstange an ihrer tiefsten Stellung angekommen ist, wo sie wieder aufwärts zu steigen beginnt. Es ist aber klar, dass die Kraft, welche auf einen Hebelarm wirkt, der sich jeden Augenblick verändert, dem sich gleichbleibenden Widerstand nicht fortwährend das Gleichgewicht halten kann. Dieses Gleichgewicht wird nur in dem Moment stattfinden, wo dieser Hebelarm, indem er sich vergrössert, einen bestimmten Werth erreicht hat; dann aber auch noch ein zweitesmal, wenn er, indem er wieder abnimmt, durch denselben Werth hindurch geht. Die Kraft kann also dem Widerstand während der abwärts gehenden Bewegung der Treibstange nur zweimal, wenn dieselbe Stellungen wie z. B. MN und M′N′ einnimmt, das Gleichgewicht halten.

So lange sich das Ende der Kurbel zwischen den Punkten M und M′ bewegt, wirkt die Kraft auf einen Hebelarm, welcher grösser ist, als es das Gleichgewicht erfordert; es reicht also schon ein Theil der Kraft hin, um den Widerstand zu überwinden; der andere Theil verursacht eine Beschleunigung der Bewegung des Schleifsteins. Wenn sich dagegen das Ende der Kurbel, während die Treibstange abwärts geht, über dem Punkt M oder unter dem Punkt M′ befindet, so kann die Kraft, da sie an einem zu kleinen Hebelarm wirkt, nur einem Theil des Widerstandes das Gleichgewicht halten, der andere Theil desselben verzögert die Bewegung. Und wenn nun vollends die Treibstange wieder emporsteigt und gar keine Kraft mehr wirkt, so wird die Bewegung des Steins durch die ganze Grösse der Widerstände verzögert. Man sieht also, dass sich die Geschwindigkeit des Steins während der Zeit, welche die Kurbel braucht, um von M nach M′ zu kommen, vergrössert; während der übrigen Zeit dagegen, in welcher die Kurbel ihre Umdrehung vollendet, indem sie von M′ über T, R, S nach M geht, nimmt die Geschwindigkeit des Steins fortwährend ab. Der Stein hat folglich seine kleinste Geschwindigkeit, wenn die Kurbel in M, und seine grösste, wenn sie in M′ ist.

Eine ähnliche Ungleichförmigkeit der Bewegung findet offenbar auch dann noch, wenn auch in minderem Grade, statt, wenn

an der Treibstange sowohl bei ihrem Hin- als bei ihrem Hergange die bewegende Kraft wirkt, wie dies z. B. bei den gewöhnlichen doppeltwirkenden Dampfmaschinen der Fall ist.

§. **172.** In den meisten Fabriken hat ein und dieselbe Kraftmaschine, eine Dampfmaschine z. B., eine grössere Anzahl von Arbeitsmaschinen, wie Drehbänke, Hobelmaschinen, Bohrmaschinen etc. zu bewegen. Gewöhnlich sind diese Maschinen aber nicht alle auf einmal in Thätigkeit. Sie erhalten ihre Bewegung von der Kraftmaschine mittelst Riemen ohne Ende, von denen wir in §. 84 gesprochen haben, und die Mittheilung der Bewegung wird während des Ganges der Kraftmaschine mittelst des Mechanismus, dessen Wesen wir in demselben Paragraphen angegeben haben, nach Belieben hergestellt und wieder unterbrochen. Im Verlauf eines Tages wechselt die Anzahl der Arbeitsmaschinen, welche in Thätigkeit sind, sehr oft; jede von ihnen bleibt zu wiederholtenmalen stehen und setzt sich wieder in Bewegung. Man sieht daraus, dass sich die Widerstände, welche die Kraftmaschine zu überwinden hat, sehr häufig und zwar oft sehr bedeutend verändern können, sodass es nur Zufall sein wird, wenn zwischen der Kraft und den Widerständen Gleichgewicht stattfindet. Wenn die Kraft grösser ist, als sie es sein müsste, um den Widerständen das Gleichgewicht zu halten, so beschleunigt sich die Bewegung an allen Maschinen, die mit der Kraftmaschine in Verbindung stehen; sie verzögert sich dagegen, wenn die Widerstände zu gross werden, um von der Kraft überwunden werden zu können.

§. **173. Das Schwungrad.** — Es ist in den meisten Fällen von Wichtigkeit, dass die Bewegung einer Maschine so viel als möglich gleichförmig ist, damit sich die Geschwindigkeit jedes beweglichen Stücks derselben nicht über eine gewisse Grenze hinaus vermehre oder vermindere. Man erreicht dies auf folgendem Wege:

Die Bewegung einer Maschine beschleunigt sich, wenn die bewegende Kraft an derselben grösser als die zu überwindenden Widerstände ist, und die Vermehrung der Geschwindigkeit wird dabei, wie wir wissen, allein durch den Ueberschuss der bewegenden Kraft über die Widerstände hervorgebracht. Mit der Vermehrung der Geschwindigkeit tritt aber zugleich eine Vermehrung der Bewegungsgrösse der bewegten Theile der Maschine ein, die nach §. 123 gleich dem Product aus der Masse dieser Theile in die Vergrösserung der Geschwindigkeit ist, welche hervorgebracht wurde. Andererseits aber kann die Vermehrung

der Bewegungsgrösse der bewegten Maschinentheile auch gleich dem Product aus jenem Ueberschuss der bewegenden Kraft über die Widerstände in die Zeit seiner Wirksamkeit gesetzt werden (s. §. 123 in Verbindung mit §. 146); wenn daher der nämliche Ueberschuss der bewegenden Kraft über die Widerstände die nämliche Zeit hindurch wirkt und also die nämliche Vermehrung der Bewegungsgrösse hervorbringt, so ist die Vergrösserung der Geschwindigkeit in demselben Verhältniss kleiner, als die Massen der bewegten Maschinentheile grösser sind.

Wenn im Gegentheil die Widerstände grösser als die bewegende Kraft sind, so verzögern sie die Bewegung der Maschine, indem sie einen bestimmten Theil der Bewegungsgrösse derselben verzehren, welcher durch das Product aus der Masse der bewegten Maschinentheile in die Verminderung der Geschwindigkeit ausgedrückt werden kann. Andererseits ist aber diese Verminderung der Bewegungsgrösse auch gleich dem Product aus dem Ueberschuss der Widerstände über die bewegende Kraft in die Zeit seiner Wirksamkeit, und wenn daher ein und derselbe Ueberschuss von Widerständen die nämliche Zeit hindurch wirksam ist, so ist doch wieder die dadurch hervorgebrachte Verminderung der Geschwindigkeit in demselben Verhältniss kleiner, als die Massen der bewegten Maschinentheile grösser sind.

Man sieht daraus, dass die Aenderungen in der Geschwindigkeit der bewegten Maschinentheile, welche durch einen bestimmten Ueberschuss der bewegenden Kräfte über die Widerstände, oder umgekehrt der Widerstände über die bewegenden Kräfte hervorgebracht werden, indem dieser Ueberschuss eine gewisse Zeit hindurch wirksam ist, um so kleiner ausfallen, je grösser die bewegten Massen der Maschine sind. Um daher die Bewegung einer Maschine möglichst gleichförmig zu machen, wird man den bewegten Theilen derselben schwere Massen in irgend einer passenden Gestalt beifügen.

Man gibt diesen beizufügenden Massen gewöhnlich die Form eines Rades wie dasjenige, welches Fig. 269 zeigt. Dieses Rad wird auf einer der sich drehenden Wellen befestigt, sodass es an der Bewegung derselben Theil nimmt. Die Wirksamkeit dieses Rades hängt offenbar nicht blos von der Masse desselben, sondern vielmehr von seinem Trägheitsmoment ab. Sein wirksamster Theil ist daher sein Kranz, der aus diesem Grunde schwerer und massenhafter gemacht wird, als es bei gewöhnlichen Rädern der Fall ist; doch müssen auch die Arme des Rades stark genug gemacht werden, um einer Zerstörung desselben, welche namentlich

durch die Centrifugalkraft hervorgerufen werden kann, vorzubeugen. Ein solches Rad nennt man Schwungrad. Manchmal bringt man anstatt eines Rades an einer der sich drehenden Wellen der Maschine zwei oder drei Arme an, welche sich in schwere gusseiserne Massen endigen (Fig. 270 und 271). Man gibt diesen Massen eine linsenförmige Gestalt, um den Widerstand zu vermindern, welchen die Luft ihrer Bewegung entgegensetzt, und welcher wegen ihrer grossen Geschwindigkeit sehr gross werden kann. Diese linsenförmigen Massen sind ausserdem so angebracht, dass der Schwerpunkt der ganzen Schwungvorrichtung, von welcher sie einen Theil bilden, auf der Umdrehungsachse der Welle gelegen ist.

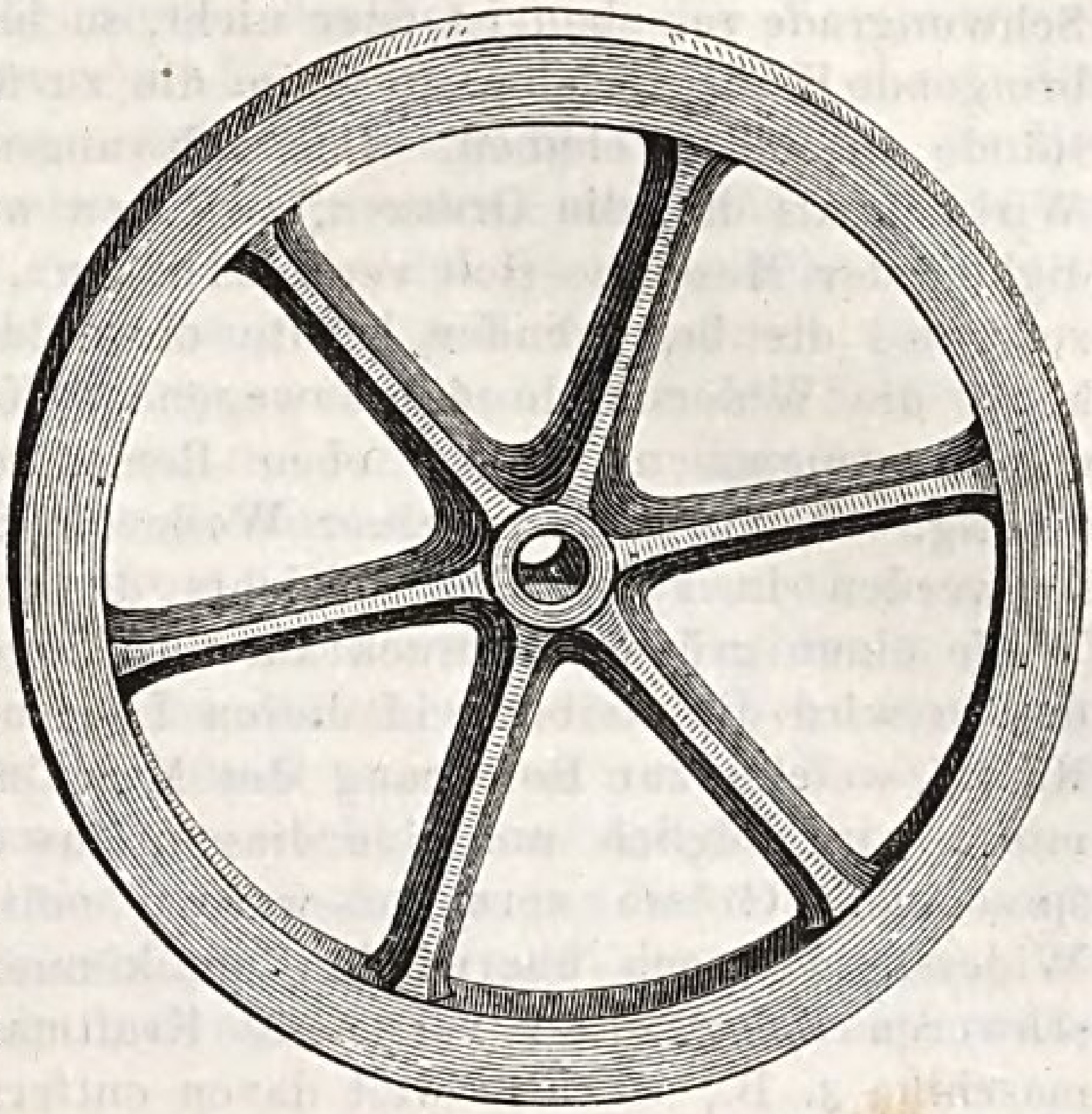


Fig. 269.

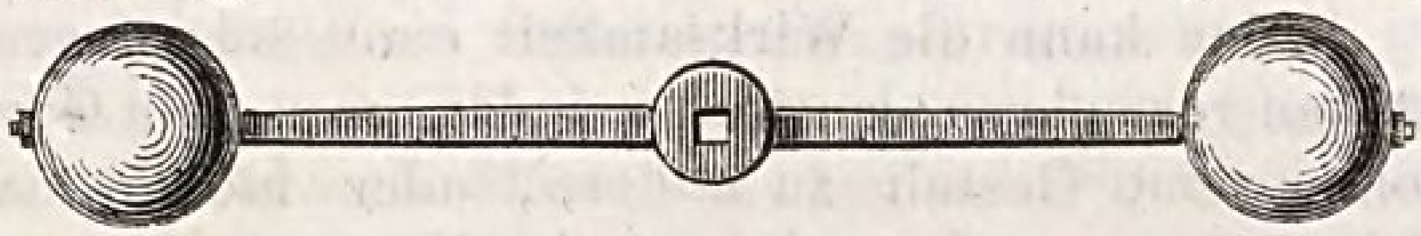


Fig. 270.

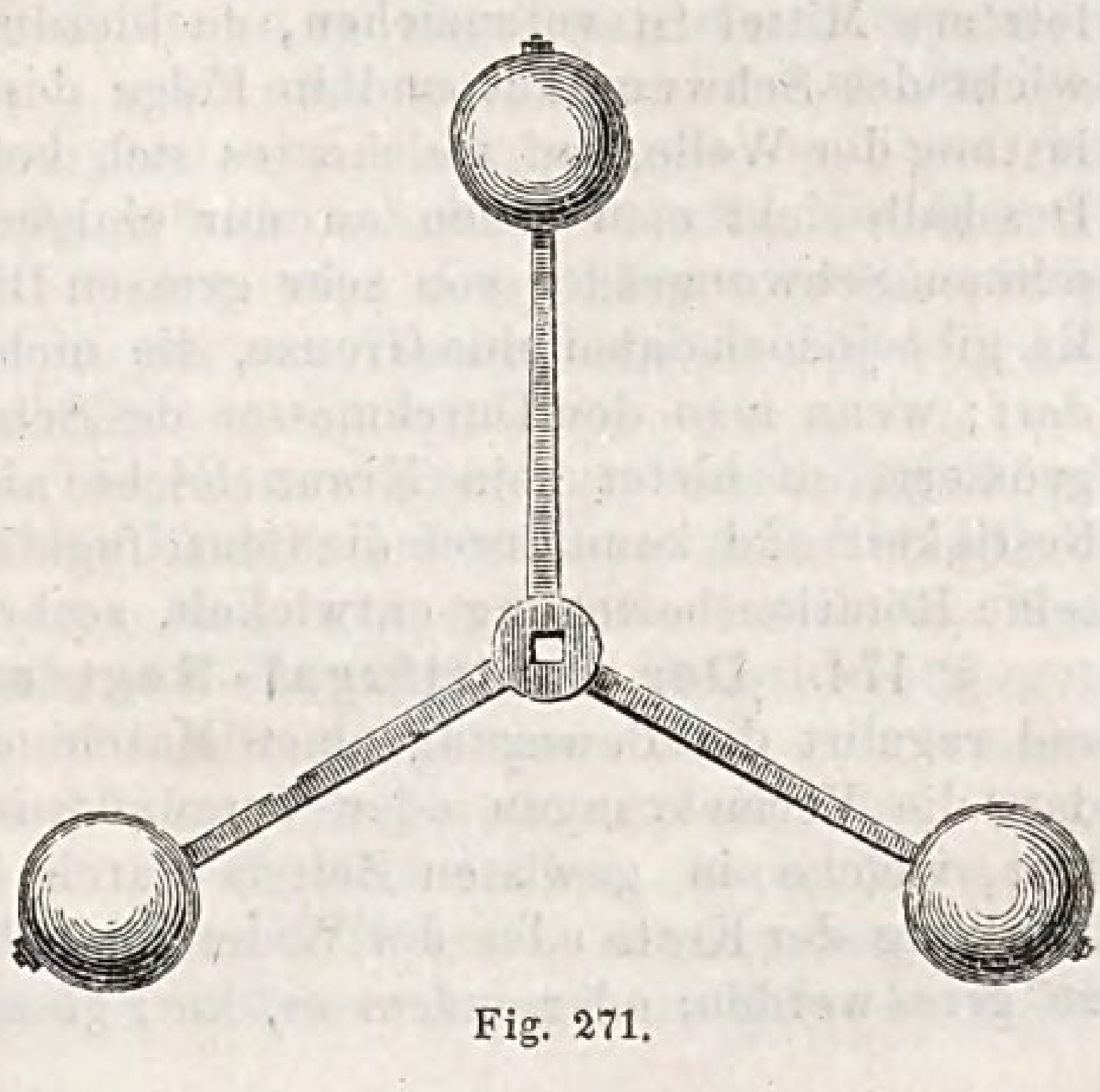


Fig. 271.

Es wird gut sein, hier zu bemerken, dass durch Hinzufügung eines Schwungrads an eine Maschine die Kraft, welche nöthig ist, um die Bewegung derselben zu unterhalten, weder vergrössert, noch verkleinert wird. Ob die Maschine mit einem

Schwungrade versehen ist oder nicht, so bleibt die an ihr anzubringende Kraft dieselbe, so lange die zu überwindenden Widerstände dieselben bleiben. Das Schwungrad hat keine andere Wirkung als die, die Grenzen, zwischen welchen die Geschwindigkeit der Maschine sich verändern kann, zu verengern, wenn zeitweise die bewegenden Kräfte die Widerstände oder umgekehrt die Widerstände die bewegenden Kräfte überwiegen. — Genau genommen ist das eben Bemerkte nicht ganz streng richtig. Wenn man an einer Welle ein Schwungrad befestigt, so werden in Folge des Gewichts desselben die Zapfen der Welle einen grösseren Druck auf ihre Lager ausüben; in Folge dessen wird die Reibung in diesen Lagern vergrössert, und die Kraft, welche zur Bewegung der Maschine angewandt werden muss, wird folglich um eine diesem Zuwachs an Reibung entsprechende Grösse vermehrt werden müssen, um sämmtliche Widerstände noch überwinden zu können. Eine mit einem schweren Schwungrad versehene Kraftmaschine, eine Dampfmaschine z. B., ist also weit davon entfernt, mehr bewegende Kraft zu liefern, als wenn jenes Rad nicht vorhanden ist; im Gegentheil wird die verfügbare Kraft der Maschine um die durch das Schwungrad veranlassten Reibungswiderstände vermindert.

Man kann die Wirksamkeit eines Schwungrads auf zweierlei Arten vermehren: entweder indem man sein Gewicht vergrössert, ohne seine Gestalt zu ändern, oder indem man ihm grössere Dimensionen gibt, ohne mehr Masse dazu zu verwenden. Das letztere Mittel ist vorzuziehen, da hierdurch ein zu grosses Gewicht des Schwungrads und in Folge dessen eine zu starke Belastung der Welle, auf welcher es sich befindet, vermieden wird. Desshalb sieht man schon an nur einigermaassen kräftigen Maschinen Schwungräder von sehr grossen Dimensionen angebracht. Es gibt jedoch dabei eine Grenze, die nicht überschritten werden darf; wenn man den Durchmesser des Schwungrads zu sehr vergrössert, so bietet sein Kranz leicht nicht mehr die nöthige Festigkeit und kann durch die Centrifugalkraft, welche sich durch seine Rotationsbewegung entwickelt, zerbrochen werden (§. 131).

§. 174. **Der Centrifugal-Regulator.** — Das Schwungrad regulirt die Bewegung einer Maschine, indem es verhindert, dass die Vermehrungen oder Verminderungen der Geschwindigkeit, welche in gewissen Zeiten durch Ungleichheiten in der Wirkung der Kraft oder der Widerstände hervorgebracht werden, zu gross werden, oder indem es, kurz gesagt, zu rasche Beschleu-

nigungen oder Verzögerungen der Bewegung der Maschine verhütet; aber es können viele Umstände vorkommen, in denen dies nicht ausreicht. Wenn sich die Widerstände, welche die Maschine überwinden muss, sehr bedeutend vermindern und daher die Kraft zu gross ist, um ihnen das Gleichgewicht zu halten, und wenn diese Verminderung lange Zeit hindurch dauert, so beschleunigt sich die Bewegung fort und fort. Das Schwungrad kann zwar verhindern, dass sich die Geschwindigkeit zu schnell vergrössert, aber dessenungeachtet kann dieselbe im Verlauf einer gehörig grossen Zeit ausserordentlich gross werden, sodass schwere Unglücksfälle eintreten oder doch wenigstens Nachtheile für die Arbeit der Maschinen daraus entstehen können. Wenn im Gegentheil die Widerstände bedeutend zunehmen und die Kraft längere Zeit hindurch nicht mehr hinreicht, ihnen das Gleichgewicht zu halten, so verzögert sich die Bewegung der Maschine ungeachtet der Gegenwart des Schwungrads, das diese Verzögerung nur verlangsamen kann, mehr und mehr und die Maschine kann endlich ganz still stehen.

In solchen Fällen ist es unerlässlich, die Kräfte selbst zu modificiren, welche an der Maschine wirken, d. h. entweder die bewegenden Kräfte oder die zu überwindenden Widerstände zu vermehren oder zu vermindern, um die Bewegung in einen normalen Zustand zurückzuführen. Man kann es zwar, wie wir gesehen haben (§§. 171 und 172), niemals dahin bringen, dass zwischen den bewegenden Kräften und den zu überwindenden Widerständen fortwährend Gleichgewicht besteht; aber man soll doch die verschiedenen Kräfte so zu reguliren suchen, dass, wenn sich auch die Bewegung nach und nach beschleunigt oder verzögert, die Geschwindigkeit sich doch niemals weit von derjenigen entfernt, welche erforderlich ist, wenn die Maschine die vollkommenste Arbeit liefern soll. Um diesen Zweck zu erreichen, wendet man mit grossem Vortheil den Centrifugal-Regulator an (Fig. 272).

Derselbe besteht im Wesentlichen aus zwei Kugeln von Gusseisen, welche an den Enden zweier Arme AB und AC befestigt sind. Diese Arme sind in A mit einer vertikalen Welle AD verbunden, welcher die Maschine eine Rotationsbewegung um ihre Längenachse mittheilt; sie können sich aber um ihre Befestigungspunkte so drehen, dass sie einen mehr oder weniger grossen Winkel mit der Welle AD bilden. Zwei Stäbe sind mittelst Scharnieren einerseits in B und C an den beiden ebengenannten Armen befestigt, andererseits an einer Hülse D, welche

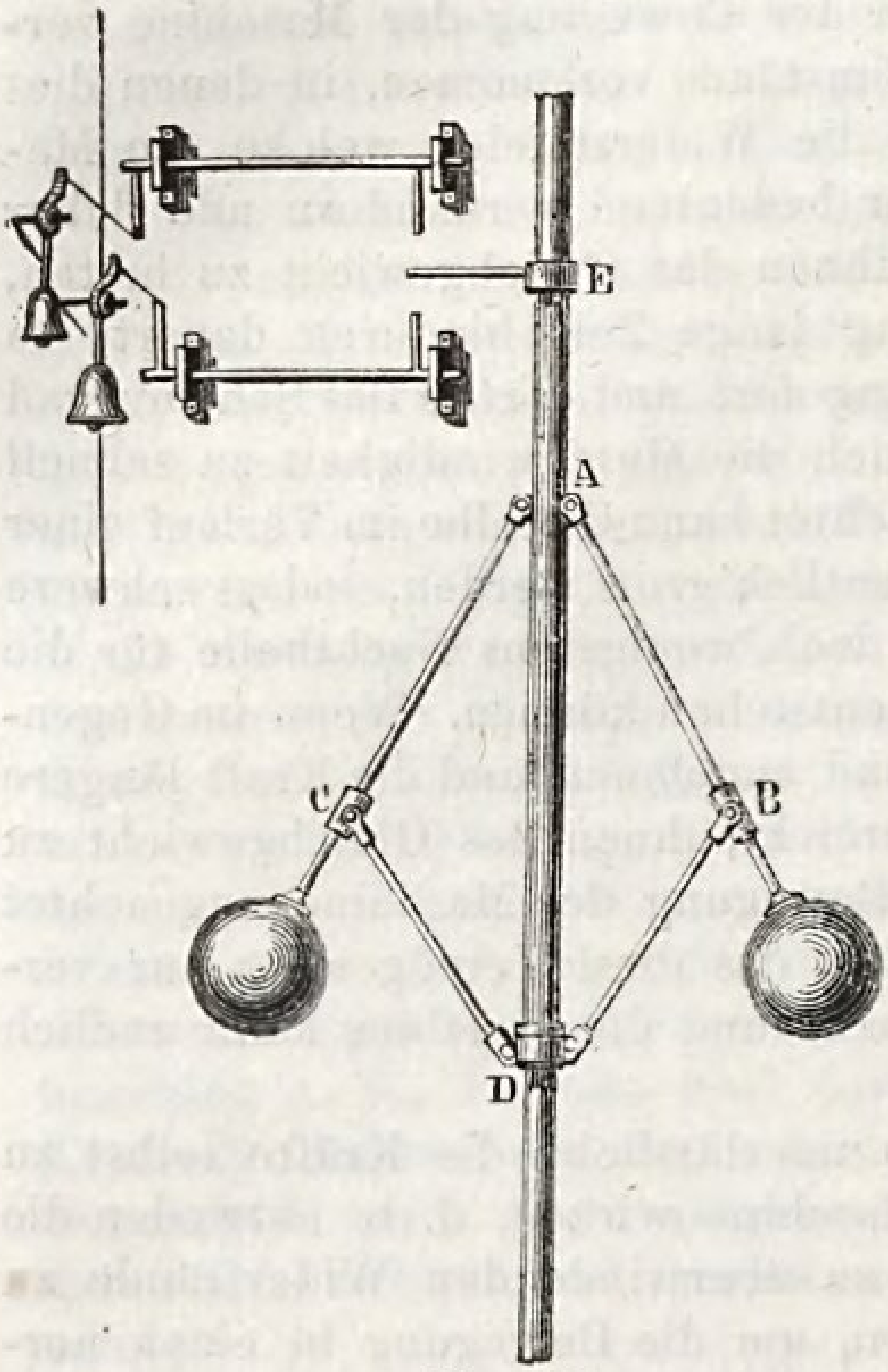


Fig. 272.

die vertikale Welle umfasst und sich längs derselben frei heben und senken kann. Wenn man die beiden Kugeln mit der Hand von einander entfernt, so verändert sich die Gestalt des Rhombus ABDC; seine Diagonale AD verkürzt sich und in Folge dessen steigt die Hülse D in die Höhe; im Gegentheil senkt sich dieselbe, wenn man die Kugeln, anstatt sie von einander zu entfernen, einander nähert.

Die vertikale Welle AD erhält von der Maschine, an welcher der Regulator angebracht ist, eine Drehungsbewegung und zugleich mit ihr die beiden Kugeln. Bei dieser Bewegung steht jede dieser beiden Kugeln unter der Wirkung zweier Kräfte: ihres Gewichtes, welches vertikal abwärts wirkt, und der Centrifugalkraft, welche durch die Rotationsbewegung entwickelt wird und horizontal vom Centrum des Kreises weg, welchen die Kugel beschreibt, nach auswärts gerichtet ist. Es ist klar, dass sich jede der beiden Kugeln so lange von der sich drehenden Welle entfernt, bis die Mittelkraft der beiden Kräfte, welche an ihr wirken, in der Verlängerung des Arms liegt, an welchem sie befestigt ist. Wenn sich die Bewegung der Maschine beschleunigt, so drehen sich die Kugeln schneller, die Centrifugalkraft vergrössert sich, und die Kugeln gehen weiter aus einander. Sie nähern sich dagegen einander, wenn die Bewegung der Maschine langsamer wird. Daraus folgt, dass sich die Hülse D hebt oder senkt, je nachdem die Schnelligkeit der Bewegung grösser oder kleiner wird. Diese auf- und abgehende Bewegung der Hülse D benützt man, um entweder auf die Kräfte oder auf die Widerstände geeignet einzuwirken.

In gewissen Fällen wirkt der Regulator selbst auf die Kraft ein, welche die Maschine in Bewegung setzt, indem er ihre Grösse vermindert, wenn die Bewegung zu schnell, oder vermehrt, wenn

die Geschwindigkeit zu klein wird. Dies ist namentlich, wie wir später sehen werden, bei den Dampfmaschinen der Fall. In anderen Fällen macht der Regulator nur einen Arbeiter aufmerksam, welcher den Gang der Maschine zu überwachen hat, und zeigt demselben an, wann die Bewegung zu schnell oder zu langsam wird. Dieser Arbeiter kann alsdann die Grösse der bewegenden Kraft abändern und sie mit den zu überwindenden Widerständen ins Gleichgewicht bringen, sodass die Geschwindigkeit der Maschine zwischen den Gränzen erhalten bleibt, welche sie nicht überschreiten soll. Die Fig. 272 zeigt eine Anordnung, welche in den Getreidemühlen angewandt wird und dazu bestimmt ist, den eben angedeuteten Zweck zu erfüllen. Die Hülse D trägt zwei vertikale Stäbe, von denen nur einer in der Figur sichtbar ist, und welche sich in der Hülse E endigen. Diese zweite Hülse ist dadurch mit der ersten so verbunden, dass sie allen Bewegungen derselben folgt; sie hebt oder senkt sich also ebenfalls, je nachdem die Bewegung der Maschine schneller oder langsamer wird. Ausserdem trägt diese Hülse, welche sich natürlich zugleich mit dem Regulator herumdreht, einen horizontalen Stift, der so angebracht ist, dass ihm bei seiner Bewegung nichts begegnet, so lange sich die Maschine mit einer passenden Geschwindigkeit bewegt. Sobald aber die Geschwindigkeit der Maschine zu gross oder zu klein wird, so stösst jener Stift bei jeder Umdrehung gegen einen von zwei kleinen Hebeln, welcher dadurch eines von zwei Glöckchen läuten macht. Diese beiden Glöckchen, von denen das eine anschlägt, wenn die Bewegung zu schnell, das andere, wenn sie zu langsam wird, haben verschiedenen Ton, sodass man sogleich unterscheiden kann, in welchem Sinne man die Grösse der Kraft abändern muss, welche die Maschine in Bewegung setzt.

§. 175. **Uebertragung der Arbeit in einer Maschine.** — Wir haben oben (§. 101) gesehen, dass im Falle der gleichförmigen Bewegung einer Maschine die Bewegungsarbeit und die Widerstandsarbeit, welche in einem bestimmten Zeitraum geleistet werden, unter sich gleich sind. Dies ist nicht mehr so in dem Fall, wo die Geschwindigkeit der Maschine veränderlich ist.

Damit sich die Bewegung der Maschine beschleunige, ist es nothwendig, dass die bewegende Kraft grösser als die zu überwindenden Widerstände ist. Denn dann hält schon ein Theil der ersteren den letzteren das Gleichgewicht, und die Maschine würde sich unter dem Einflusse dieses Theils allein schon gleichförmig bewegen. Die Bewegungsarbeit dieses Theils der Kraft ist also

schon gleich der gesammten Widerstandsarbeit. Der andere Theil derselben vermehrt die Geschwindigkeit der Maschine und leistet dadurch, wie wir aus §. 152 wissen, eine Arbeit, welche gleich der Vermehrung der lebendigen Potenz ist, welche die gesammten bewegten Maschinentheile in Folge der Vergrösserung ihrer Geschwindigkeit erfahren. Es ist also die Bewegungsarbeit, welche durch die ganze bewegende Kraft geleistet wird, grösser als die gesammte Widerstandsarbeit, und zwar grösser um den Zuwachs an lebendiger Potenz, welchen die Maschine durch Beschleunigung ihrer Bewegung erfährt.

Damit sich die Bewegung der Maschine verzögere, ist es nothwendig, dass die zu überwindenden Widerstände die bewegende Kraft übertreffen. Diese letztere hält also nur noch einem Theil der Widerstände das Gleichgewicht, und die gesammte Bewegungsarbeit ist gleich der Widerstandsarbeit, welche von diesem Theil allein schon geleistet wird. Der übrige Theil der Widerstände verzögert die Bewegung und leistet dadurch eine Arbeit, welche gleich ist der in Folge der Verminderung der Geschwindigkeit eintretenden Verminderung an lebendiger Potenz der Maschine. Die ganze Widerstandsarbeit ist also grösser als die Bewegungsarbeit, und zwar grösser um die Verminderung, welche die lebendige Potenz der Maschine in Folge der Verzögerung der Bewegung erfährt.

So ist also die Bewegungsarbeit bald grösser, bald kleiner als die Widerstandsarbeit, welche während der nämlichen Zeit geleistet wird, je nachdem sich der Gang der Maschine beschleunigt oder verzögert, d. h. je nachdem sich die lebendige Potenz derselben vergrössert oder verkleinert. Aber wir wissen schon aus §. 125, dass die Arbeit, welche aufgewendet werden muss, um die Geschwindigkeit eines Körpers um eine gewisse Grösse zu vermehren, gleich der Arbeit ist, welche die Widerstände leisten müssen, um die Geschwindigkeit um ebensoviel wieder zu vermindern. Wenn also eine Maschine in zwei verschiedenen Augenblicken dieselbe Geschwindigkeit besitzt, so haben sich im Verlauf der dazwischen liegenden Zeit die abwechselnden Ueberschüsse der Bewegungs- oder Widerstandsarbeit gegenseitig vollständig compensirt, welches auch die Aenderungen sind, welche die Geschwindigkeit in diesem Zeitintervall erfahren hat; die gesammte Bewegungsarbeit in diesem Zeitintervall ist folglich genau gleich der Widerstandsarbeit, welche in demselben Zeitintervall geleistet wurde. Dies findet natürlich auch noch statt, wenn man jenen Zeitraum über die ganze Bewegung der Maschine von dem Augen-

blick an, wo dieselbe begonnen hat, bis zu dem Augenblick, wo die Maschine wieder in den Zustand der Ruhe zurückgekehrt ist, ausdehnt.

Wenn eine Maschine ihrer Natur nach keine gleichförmige Bewegung annehmen kann, wie wir das bei dem Schleifstein im §. 171 gesehen haben, so ist ihre Bewegung gewöhnlich eine solche, die man regelmässig oder auch gleichförmig periodisch nennt; die Beschleunigungen und Verzögerungen ihrer Bewegung folgen sich periodisch in der Weise, dass die verschiedenen Theile der Maschine, wenn sie in dieselbe Lage zurückkehren, dieselbe Geschwindigkeit wieder annehmen. Dies ist z. B. in der That bei dem Schleifstein (§. 171) der Fall, vorausgesetzt, dass schon einige Zeit, seitdem er in Bewegung gesetzt wurde, verflossen ist; derselbe nimmt offenbar am Ende jeder Umdrehung, welche er macht, dieselbe Geschwindigkeit wieder an, welche er am Anfang derselben hatte. In einem solchen Fall findet die Gleichheit der Bewegungs- und Widerstandsarbeit während jeder Periode der Bewegung statt.

Wenn man die Bewegung einer Maschine während der Zeit betrachtet, welche vom Beginn der Bewegung an bis zu dem Moment verfliesst, wo ihre Bewegung gleichförmig oder wenigstens gleichförmig periodisch geworden ist, so wird man finden, dass die Bewegungsarbeit in diesem Zeitraum, welchen man den **Anlauf** der Maschine nennt, grösser als die Widerstandsarbeit ist, und zwar grösser um die lebendige Potenz, welche die Maschine zu Ende jenes Zeitraums besitzt. Denn der Ueberschuss der ersteren über die zweite wurde eben dazu verwendet, der Maschine die Geschwindigkeit zu ertheilen, welche sie am Ende jenes Zeitraums hat. Während der ganzen Zeit des regelmässigen Gangs der Maschine ist die Bewegungsarbeit genau gleich der Widerstandsarbeit. Wenn aber die Maschine ihren regelmässigen Gang verlässt, um allmählich in den Zustand der Ruhe überzugehen, wird die Widerstandsarbeit grösser als die Bewegungsarbeit, und am Ende dieses ganzen Zeitraums, den man den **Auslauf** der Maschine nennt, übertrifft sie dieselbe um die ganze Grösse wieder, um welche sie von ihr während des ersten Theils des Gangs der Maschine übertroffen worden ist. Es ist also, wie wir schon gesagt haben, die Bewegungsarbeit, welche während der ganzen Dauer von der Maschine geleistet wird, gleich der in derselben Zeit aufgewendeten Widerstandsarbeit.

Wir haben in der vorhergehenden Untersuchung von einer Gestaltsveränderung, welche einer oder der andere der Maschinen-

theile in Folge der Veränderung der gegenseitigen Lage seiner Moleküle bei der Mittheilung der Bewegung (s. §. 154) erfahren könnte, und welche nicht gerade im Zwecke der Maschine liegt, ganz abgesehen. Solche Veränderungen nehmen immer einen Theil der Bewegungsarbeit in Anspruch; derselbe wird aber entweder ganz oder doch theilweise wieder zurückerstattet, wenn der betreffende Körper ganz oder theilweise in seinen vorigen Zustand wieder zurückkehrt.

Das hier Vorgetragene ist offenbar nichts anderes, als die Anwendung des in §. 152 gelehrten Princips der Erhaltung der lebendigen Potenz auf Maschinen, und kann daher die am Schlusse jenes Paragraphs für Körper im Allgemeinen aufgestellte Gleichung

$$A - W = \Sigma \tfrac{1}{2} m v'^2 - \Sigma \tfrac{1}{2} m v^2$$

hier direkt auf Maschinen übertragen werden. Und wenn ausserdem auch Aenderungen der Lage des Schwerpunkts der ganzen Maschine vorkommen, so ist die rechte Seite dieser Gleichung wie in §. 153 durch das Glied $P\,(H' - H)$ zu ergänzen. So oft die Geschwindigkeit v' zu Ende des betrachteten Bewegungsabschnitts gleich der v am Anfang wird, ist die rechte Seite jener Gleichung Null, also $A = W$, die Bewegungsarbeit gleich der Widerstandsarbeit. — Je länger die Bewegung der Maschine dauert, desto grösser werden A und W, während die Geschwindigkeit eine gewisse Grösse nicht übersteigen kann und darf. Ueber einen gehörig langen Zeitraum ausgedehnt, wird man desshalb immer die rechte Seite jener Gleichung vernachlässigen und $A = W$ setzen dürfen. — Man nennt das Princip der Erhaltung der lebendigen Potenz (§. 152) auch manchmal das Princip der Uebertragung der Arbeit in einer Maschine.

§. 176. **Wirkung des Schwungrads bei der Uebertragung der Arbeit.** — Allemal, wenn die Bewegungsarbeit grösser ist als die Widerstandsarbeit, verwandelt sich der Ueberschuss der ersteren über die zweite in Bewegung, und es erfolgt eine Beschleunigung der Geschwindigkeit und zwar der Art, dass die dadurch bedingte Vermehrung der lebendigen Potenz der Maschine gleich jenem Ueberschuss der Bewegungsarbeit über die Widerstandsarbeit ist. Damit jene Beschleunigung nicht zu gross wird, wendet man das Schwungrad an. Aber wenn dasselbe auch die Vergrösserung der Geschwindigkeit vermindert, so vermindert es doch nicht die Wirkung, welche dieselbe hervorbringen kann. Die Vermehrung der lebendigen Potenz, welche durch den Ueberschuss der Bewegungsarbeit über die Widerstandsarbeit veranlasst wird, vertheilt sich über eine grössere Masse, als wenn das Schwungrad nicht vorhanden wäre, und dadurch ist eben die Aenderung der Geschwindigkeit eine geringere; aber diese Vermehrung der lebendigen Potenz, welche sich grösstentheils in der Masse des Schwungrads anhäuft, ohne dass

die Geschwindigkeit der Maschine sehr merklich modificirt wird, ist desshalb nicht minder fähig, dieselbe Quantität von Widerstandsarbeit wieder hervorzubringen. Unter diesem Gesichtspunkt kann man sagen, dass das Schwungrad ein Reservoir von Arbeit sei. Wenn die Bewegungsarbeit die Widerstandsarbeit übertrifft, so sammelt sich der Ueberschuss der ersten über die zweite unter der Form von lebendiger Potenz im Schwungrad an, und wenn die Gelegenheit kommt, so erzeugt diese in Reserve gehaltene Arbeit eine gleiche Quantität von Widerstandsarbeit.

Wenn eine Maschine mit einem Schwungrad versehen ist, so ist eine grössere Menge von Arbeit zu leisten, um sie in Bewegung zu setzen und ihr die passende Geschwindigkeit zu geben, als wenn das Schwungrad nicht vorhanden wäre: der Ueberschuss der Bewegungsarbeit über die Widerstandsarbeit während des Anlaufs der Maschine muss grösser sein, als er es ohne Schwungrad wäre. Aber wir haben gesehen, dass dieser Ueberschuss der Bewegungsarbeit nicht verloren ist; er wird im letzten Abschnitt der Bewegung der Maschine wieder benützt und veranlasst stets die Erzeugung einer gleichen Quantität von Widerstandsarbeit.

§. 177. **Einfluss der passiven Widerstände.** — Bei allem, was wir bisher über die Bewegung der Maschinen gesagt haben, haben wir immer von der Reibung zwischen den verschiedenen Theilen derselben, überhaupt von dem, was wir unter dem Namen der passiven Widerstände (§. 164) begriffen haben, abstrahirt. Die Resultate, welche wir erhalten haben, müssen also in dieser Beziehung vervollständigt werden. Diese Ergänzung ist aber sehr einfach; es reicht hin, die passiven Widerstände als einen Theil der Widerstände im Allgemeinen zu betrachten, welche durch die bewegende Kraft überwunden werden müssen, um alles, was wir oben gefunden haben, mit völliger Genauigkeit auch noch jetzt anwendbar zu machen.

Indem wir verschiedene Maschinen unter dem Gesichtspunkt des Gleichgewichts der Kräfte, welche an ihnen wirken, betrachteten, haben wir gesehen, wie man in jedem Fall die Grösse der Kraft finden kann, welche im Stande ist, bestimmten Widerständen das Gleichgewicht zu halten. Um den Werth dieser Kraft genau zu erhalten, muss man aber nicht allein die Widerstände in Rechnung ziehen, welche zu überwinden im Zwecke der Maschine liegt, sondern auch noch die passiven Widerstände aller Art, welche durch die Anwendung dieser Maschine hervor-

gerufen werden. Die Kraft, welche wirklich nothwendig ist, um eine Maschine im Gleichgewicht zu halten, ist immer grösser, als wenn die passiven Widerstände nicht existiren würden.

Indem wir die Maschinen im Zustande der gleichförmigen Bewegung betrachteten, haben wir gefunden, dass die Bewegungsarbeit immer gleich der Widerstandsarbeit sein muss. Zu demselben Resultat gelangten wir auch im Fall der nicht gleichförmigen Bewegung einer Maschine unter der Bedingung, dass man die Grösse der Arbeit während eines Zeitraums auswerthet, an dessen Anfang und Ende die Maschine die gleiche Geschwindigkeit besitzt. Diese Gleichheit der Bewegungs- und Widerstandsarbeit besteht auch dann noch, wenn man die passiven Widerstände nicht mehr vernachlässigt; aber man muss, indem man die Widerstandsarbeit berechnet, auch diejenige mit hinzunehmen, welche den passiven Widerständen entspricht.

Die Widerstände, welche man bei der Untersuchung einer in Bewegung befindlichen Maschine in Berücksichtigung ziehen muss, sind folglich zweierlei Art: Die einen sind diejenigen, deren Ueberwindung eben die Aufgabe der Maschine ist; sie heissen desshalb auch Nutzwiderstände; die andern sind die passiven Widerstände. Der Theil der Widerstandsarbeit, welche den ersteren entspricht, führt den Namen nützliche Arbeit, Nutzarbeit, und das Princip der Uebertragung der Arbeit lässt sich daher folgendermaassen aussprechen: Die Bewegungsarbeit ist gleich der Nutzarbeit, vermehrt um die Arbeit, welche aus den passiven Widerständen entspringt.

Unter Nutzeffekt oder Wirkungsgrad einer Maschine versteht man endlich das Verhältniss der ganzen aufgewendeten Bewegungsarbeit zu der damit erzielten Nutzarbeit. So sagt man z. B. der Nutzeffekt oder Wirkungsgrad einer Maschine sei 0,75 oder 75 Procent, wenn die mit derselben geleistete Nutzarbeit 75 Procent der ganzen aufgewendeten Bewegungsarbeit ist; die andern 25 Procent wurden dann zur Ueberwindung der passiven Widerstände verwendet.

Bezeichnet man wieder mit A die Bewegungsarbeit, mit W_n die zur Ueberwindung der nützlichen und mit W_p die zur Ueberwindung der passiven Widerstände nothwendige Widerstandsarbeit, so ist

$$A = W_n + W_p,$$

vorausgesetzt, dass die Bewegung gleichförmig ist oder dass man die Aenderungen in der Geschwindigkeit vernachlässigt. Der Nutzeffekt N der Maschine ist dann

$$N = \frac{W_n}{A} \text{ oder } = \frac{A - W_p}{A}.$$

Es ist, wie wir in den §§. 68 bis 96 gesehen haben, im Allgemeinen sehr leicht, die Grösse der Kraft zu finden, welche im Stande ist, einem gegebenen Widerstand mit Hilfe einer Maschine das Gleichgewicht zu halten, wenn man die passiven Widerstände nicht in Rechnung zieht; aber dem ist nicht mehr so, wenn dieselben berücksichtigt werden sollen. Die passiven Widerstände sind meist nur schwer genau zu bestimmen. Am wenigsten Schwierigkeiten machen in dieser Beziehung diejenigen, welche aus der Reibung entspringen, und glücklicherweise sind es gerade diese, welche den grössten Einfluss ausüben, einen grössern, als alle andern zusammengenommen, besonders wenn die Maschine keine zu grosse Geschwindigkeit besitzt. Die zahlreichen Versuche, welche angestellt worden sind, um die Grösse der Reibung und die Gesetze, nach welchen sie wirkt, zu ermitteln, gestatten, sie mit ziemlicher Genauigkeit zu bestimmen; indessen bleibt in jedem einzelnen Fall immer einige Ungewissheit über ihre Grösse, namentlich aus dem Grunde, dass die Oberflächen der sich reibenden Körper nicht ganz dieselben sind als diejenigen, welche man bei der Bestimmung des Reibungscoëfficienten dem Experimente unterworfen hat, sowie auch aus dem Grunde, dass die Drückungen, durch welche die Reibung hervorgerufen wird, nicht immer vollständig bekannt sein können. Zudem sind die Reibungswiderstände, welche man bei einer Maschine in Rechnung ziehen muss, gewöhnlich ziemlich zahlreich; sie entwickeln sich zwischen den Zähnen der Verzahnungen, zwischen den Zapfen der Wellen und den Lagern, in welchen sie sich drehen, u. s. w. Wenn man daher auch nur die Grösse des Theils der Kraft, welche allein den Widerständen der Reibung das Gleichgewicht halten soll, berechnen will, so wird schon dadurch die Rechnung sehr complicirt. Ausser der Reibung gibt es aber auch noch andere passive Widerstände an einer Maschine, welche nur mit grober Annäherung berechnet werden können. Man sieht also, dass man nicht hoffen darf, die Grösse der Kraft, welche allen diesen Widerständen das Gleichgewicht halten kann, genau zu berechnen, wenigstens nicht bei solchen Maschinen, die nicht sehr einfach sind.

Aus demselben Grunde hat es seine Schwierigkeit, die Grösse der Widerstandsarbeit genau zu berechnen, welche den verschiedenen passiven Widerständen während irgend eines Zeitraumes entspricht, und dadurch festzusetzen, um wie viel während dieser Zeit die Bewegungsarbeit die Nutzarbeit übertrifft.

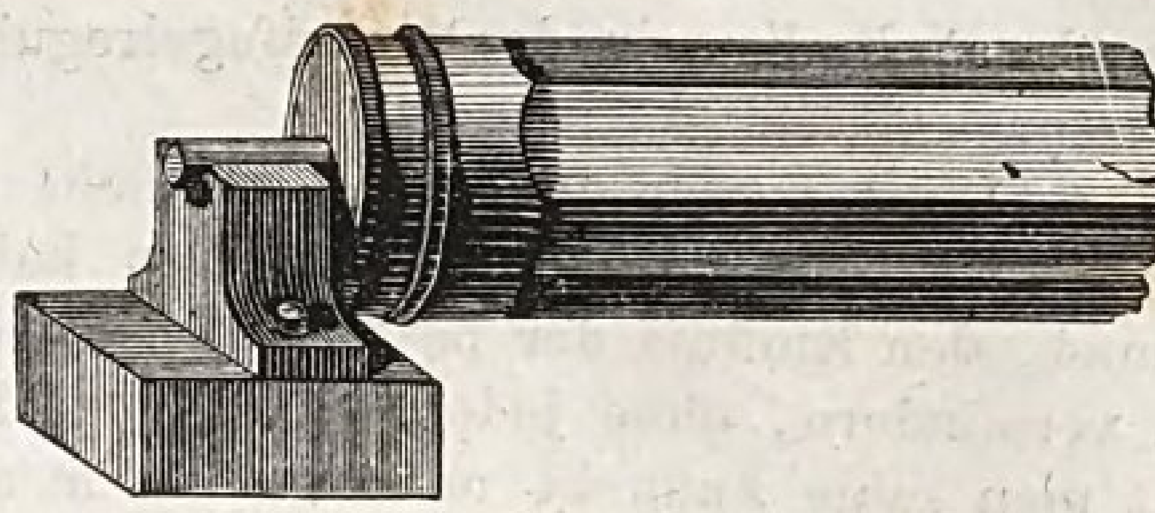
Man muss sich daher in den meisten Fällen damit begnügen, zu wissen, dass zur Ueberwindung eines bestimmten Nutzwider-

standes eine um so grössere Kraft nothwendig ist, je grösseren Einfluss die passiven Widerstände haben, und dass zur Leistung einer bestimmten Nutzarbeit eine um so grössere Menge Bewegungsarbeit aufgeboten werden muss, je grösser die aus den passiven Widerständen entspringende Arbeit ist. Bei der Construction einer Maschine muss man stets bemüht sein, den Einfluss der passiven Widerstände so viel als möglich zu verringern, damit zur Leistung einer gegebenen Quantität von Nutzarbeit die kleinstmögliche Quantität von Bewegungsarbeit aufgeboten zu werden braucht. Aus dem Gesichtspunkt der Ersparung an Kraft wird die Vollkommenheit einer Maschine nach der Grösse des Verhältnisses beurtheilt werden müssen, welches zwischen der Nutz- und Bewegungsarbeit besteht, d. h. nach ihrem Nutzeffekt. Dieses Verhältniss ist immer kleiner als die Einheit; aber die Maschine wird um so vollkommener sein, je mehr es sich der Eins nähert.

§. 178. **Mittel, um den Einfluss der passiven Widerstände zu vermindern.** — Um den Einfluss der passiven Widerstände zu vermindern, wendet man verschiedene Mittel an, von denen wir nun die wichtigsten kennen lernen wollen. Wir nehmen dieselben in der Ordnung durch, wie wir oben die verschiedenen Arten der Widerstände angegeben haben.

Die Arbeit, welche aus der Reibung zweier Stücke, welche auf einander gleiten, entspringt, hängt bekanntlich zu gleicher Zeit von der Grösse der Reibung und von der Grösse des Weges ab, welchen ihr Angriffspunkt beschreibt. Um diese Widerstandsarbeit zu vermindern, kann man auf jedes der beiden Elemente, aus denen sie sich zusammensetzt, einwirken. Man wird daher zunächst die Grösse der Reibung vermindern, indem man die Stoffe, aus denen die aufeinander gleitenden Stücke bestehen, passend auswählt, indem man ferner die sich berührenden Oberflächen derselben gut polirt und sie ausserdem fortwährend mit Oel oder Fett gut geschmiert erhält. Andererseits wird man die Ausdehnung, über welche hin das Gleiten stattfindet, so viel als möglich beschränken, was meist dadurch geschehen kann, dass man die Stücke, zwischen welchen das Gleiten stattfindet, von passender Form nimmt.

Aus diesem letzteren Grunde endigen sich gewöhnlich die Wellen, welche eine Drehungsbewegung erhalten sollen, in eisernen Zapfen von kleinerem Durchmesser (Fig. 273). Während die Welle eine ganze Umdrehung macht, durchläuft der Angriffspunkt der Reibung des Zapfens in seinem Lager blos die Peripherie dieses Zapfens. Dieser Weg ist also um so kleiner je kleiner der Durch-


Fig. 273.

messer des Zapfens ist. Man vermindert daher diesen Durchmesser so viel als möglich, ohne jedoch den Zapfen so schwach zu machen, dass er unter dem Druck, welchen er zu ertragen hat, abbrechen könnte.

Aus demselben Grunde construirt man die Verzahnungen so, dass sie möglichst kleine und zahlreiche Zähne erhalten. Denn je grösser die Zähne sind, desto bedeutender ist die Fläche, in welcher sie aufeinander gleiten. Doch gibt es auch hier eine Grenze, da die Zähne, wie vorhin die Zapfen, noch hinreichende Stärke besitzen müssen, um vor dem Abbrechen geschützt zu sein.

§. 179. Um die Wirkung des Widerstandes des Rollens möglichst zu vermindern, muss man einestheils dafür sorgen, dass die sich berührenden Oberflächen möglichst glatt seien, und anderntheils, dass der Theil der Kraft, welcher dem Widerstand des Rollens das Gleichgewicht halten soll, an einem möglichst grossen Hebelarm wirkt.

Die Widerstandsarbeit, welche durch die Steifigkeit der Seile hervorgebracht wird, kann man nur dadurch vermindern, dass man biegsame Seile verwendet. In dieser Beziehung sind Seile, welche schon einmal gebraucht worden sind, neuen sehr vorzuziehen.

Um endlich die Maschinen so viel als möglich dem Widerstand des Mittels, in welchem sie sich bewegen, zu entziehen, gibt man den Theilen derselben, welche diesem Widerstand am meisten und unmittelbar ausgesetzt sind, eine solche Form, dass derselbe wenigstens grösstentheils beseitigt wird. Desshalb werden diese Stücke derart gestaltet und so angebracht, dass sie dem Widerstand des Mittels bei ihrer Bewegung nur eine geringe Oberfläche darbieten, und dass sie nach der Seite hin, nach welcher die Bewegung stattfindet, sehr spitze Winkel kehren, mit denen sie die Luft oder das Wasser leicht durchschneiden können. Aus diesem Grund gibt man auch, wie wir schon gesagt haben, den Massen, welche an den Enden der Arme der Schwungvorrichtung angebracht sind, die an gewissen Maschinen das Schwungrad ersetzen soll (Fig. 270 und 271), eine linsenförmige Gestalt und lässt sie mit ihrer schmalen Seite die Luft durchschneiden; um denselben Zweck zu erreichen, ersetzt man

manchmal die Kugeln des Centrifugalregulators durch ebensolche Linsen.

§. 180. Ausser den Mitteln, welche wir in den beiden vorhergehenden Paragraphen angegeben haben, und welche dazu dienen, den Einfluss der passiven Widerstände soviel als möglich zu vermindern, ohne jedoch die Natur derselben zu verändern, hat man seine Zuflucht noch zu einem andern sehr wirksamen Mittel genommen; dieses besteht darin, in gewissen Fällen den Widerstand des Gleitens oder die Reibung wenigstens zum grössten Theil durch den Widerstand des Rollens zu ersetzen.

Als Beispiel hiefür können die Rollen angeführt werden, welche man an den Füssen gewisser Möbeln anbringt, und welche gestatten, dieselben leichter von einem Ort zum andern zu schaffen, ohne sie vom Boden erheben zu müssen. Wenn diese Rollen nicht vorhanden wären, müssten die Füsse dieser Möbeln über den Boden hingleiten, wozu eine bedeutend grössere Kraft erforderlich wäre. Da, wo die Bewegung nur immer in derselben Richtung ausgeführt werden soll, wie z. B. bei Bettstellen, sind die Achsen der Rollen an den Füssen festgemacht, natürlich senkrecht auf die Richtung der Bewegung (Fig. 274). Aber wenn die Bewegung nach allen Richtungen hin soll geschehen können, wie bei Tischen oder Fauteuils, dann ist die Achse A der Rolle (Fig. 275) an einer Zwinge B befestigt, welche selbst um eine vertikale Achse CD drehbar ist. Wenn man den Fuss, welcher eine solche Rolle trägt, zu verschieben sucht, so beginnt die Zwinge sich um CD zu drehen, sodass sich die Rolle zuerst auf die Seite stellt, welche entgegengesetzt von derjenigen ist, nach welcher hin die Bewegung geschehen soll; alsdann erst dreht sie sich um ihre Achse A, indem sie auf dem Fussboden fortrollt.

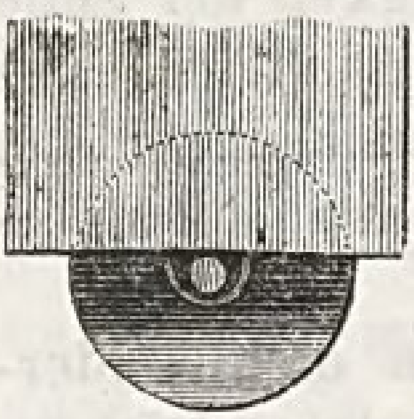


Fig. 274.

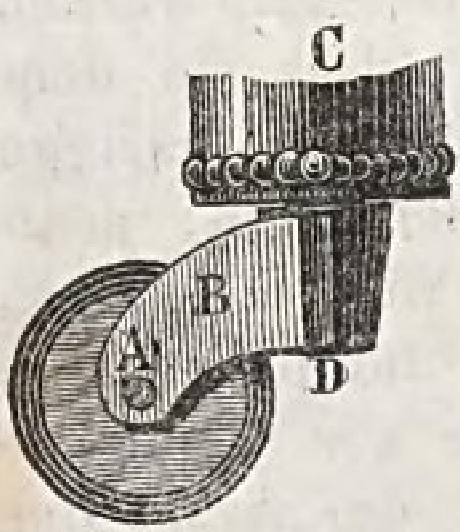


Fig. 275.

Die Rollen, welche man bei den Maschinen anwendet, um ein Gleiten durch ein Rollen zu ersetzen, heissen gewöhnlich Frictionsrollen. Wir haben ein Beispiel von denselben schon bei dem Krahn gesehen, der auf S. 163 abgebildet ist. Die vertikale Achse PP des Krahns zeigt an der Stelle, wo er sich über das Grundmauerwerk erhebt, einen cylindrischen Theil R. Dieser Theil, welcher sich in einer kreisförmigen Oeffnung von demselben Durchmesser drehen muss, übt gegen die Wände dieser Oeffnung

einen sehr grossen Druck aus. Es ist daher von grosser Bedeutung, dass in der Bewegung, welche man dem Krahn um seine vertikale Achse gibt, anstatt des Gleitens ein Rollen hervorgebracht wird, damit dieses Drehen nicht eine allzugrosse Kraft erfordert. Desshalb hat man rings um den cylindrischen Theil R Frictions-Rollen S angebracht, die an einem beweglichen, ringförmigen Stück befestigt sind, wie es Fig. 276 zeigt. Wenn der Krahn gedreht wird, so rollt jede dieser Frictionsrollen zwischen der cylindrischen Oberfläche R (Fig. 132) und der cylindrischen concaven Fläche eines Metallrings, welcher in das Mauerwerk eingelassen ist. Die Achsen der Frictionsrollen bleiben dabei, wie man sieht, nicht unbeweglich, und in ihre Bewegung ziehen sie natürlich auch das ringförmige Stück mit fort, an dem sie befestigt sind, indem sie ihm

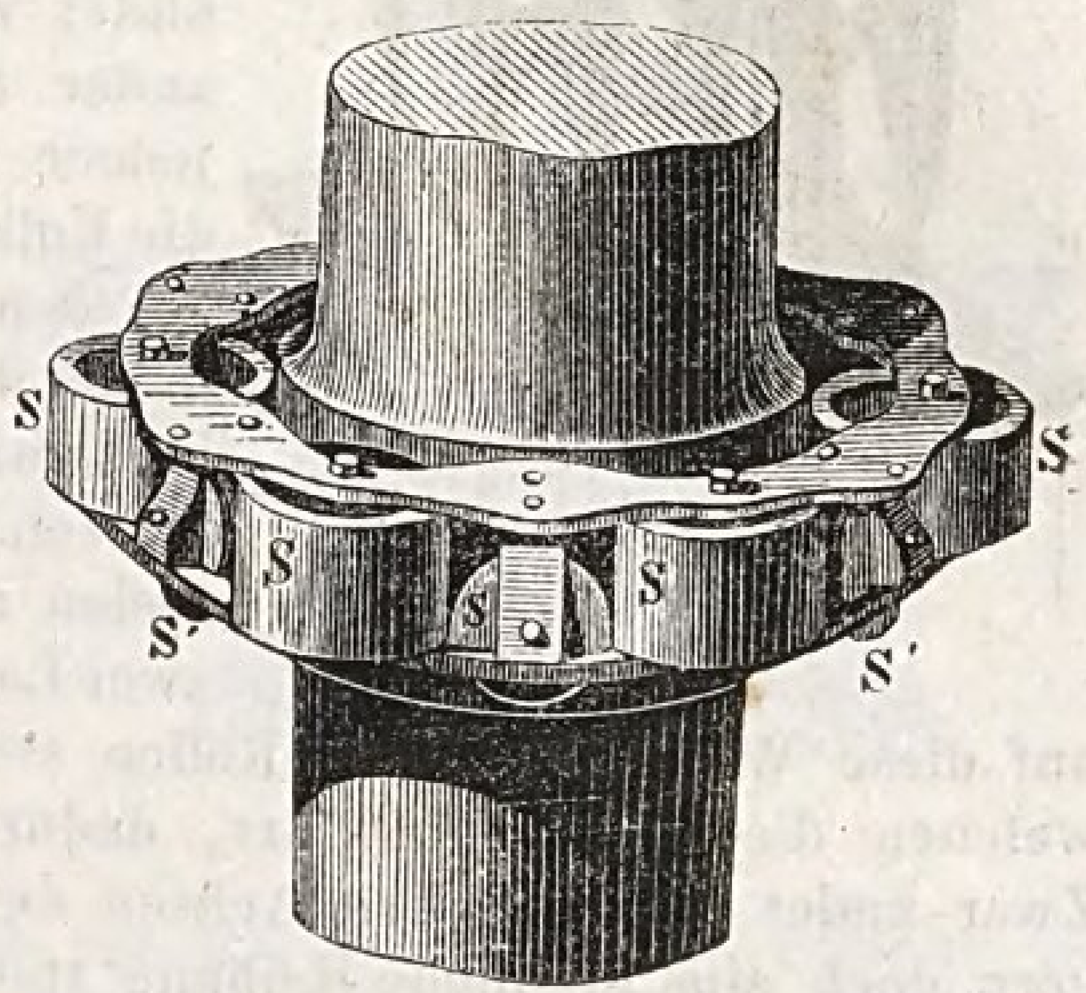


Fig. 276.

eine Drehungsbewegung ertheilen, welche aber langsamer als die des Krahns ist. Die Frictionsrollen und jener Ring müssen natürlich unten unterstützt werden, da sie sonst durch gar nichts gehalten wären. Sie ruhen zu diesem Zweck auf einer horizontalen ringförmigen Fläche, und um ihre Reibung auf dieser Fläche zu vermeiden, hat man noch andere Frictionsrollen S′S′ angebracht, deren Achsen horizontal sind und auf welche sich der ganze Apparat, mit dem wir uns eben beschäftigen, stützt.

Bei der *Atwood*'schen Fallmaschine, welche wir oben (§. 112) beschrieben haben, muss die Rolle an dem obersten Theil ausserordentlich leicht beweglich sein; denn die Versuche, welche mit dieser Maschine ausgeführt werden sollen, erhalten nur dann den genügenden Grad von Genauigkeit, wenn die dabei stattfindende Bewegung so wenig als nur immer möglich durch die Wirkung der passiven Widerstände gestört wird. Um dies zu erreichen, hat man eine besondere Methode erdacht, die Achse jener Rolle aufruhen zu lassen, welche wir nun beschreiben wollen. Durch die Mitte der Rolle A (Fig. 277) geht eine cylindrische Achse von sehr kleinem Durchmesser, welche mit der Rolle in fester Verbindung ist. Wenn diese Achse auf beiden Seiten in Lager

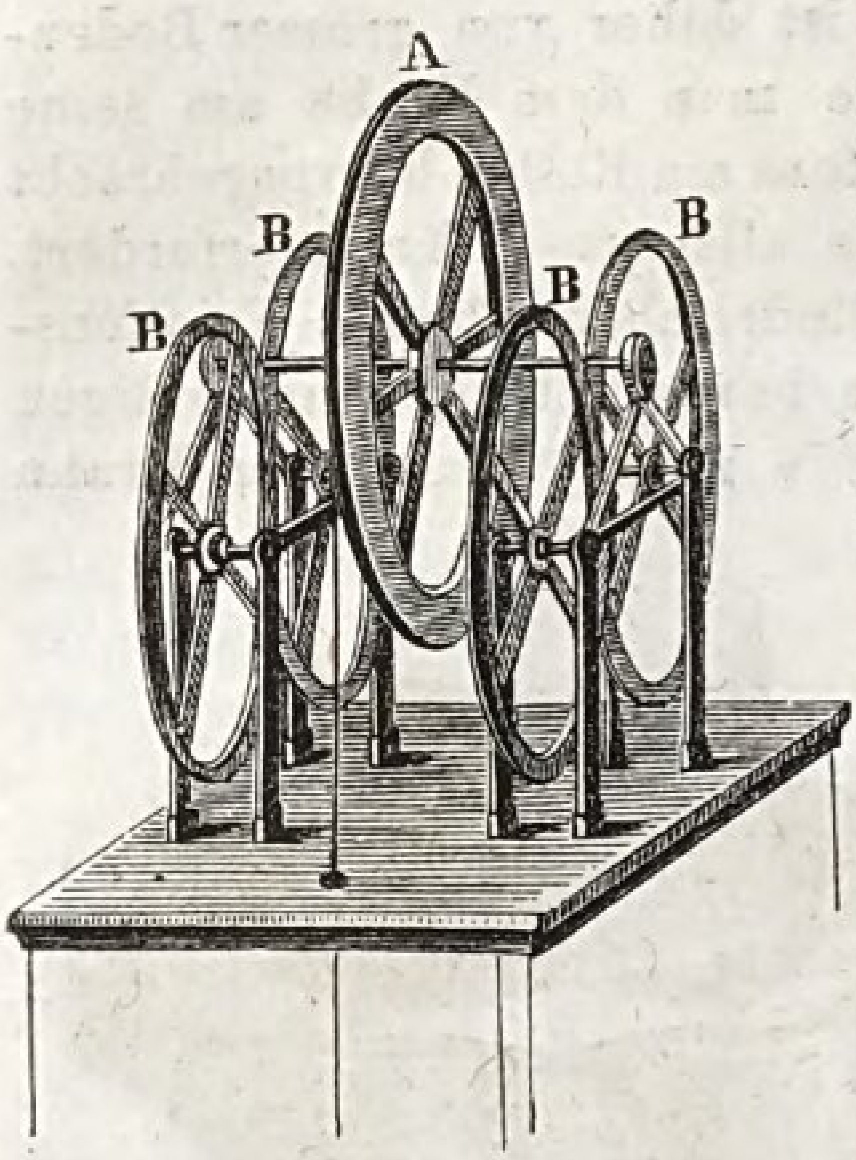


Fig. 277.

gelegt würde, so würde sie während der Bewegung der Rolle eine gleitende Reibung zu überwinden haben; anstatt dessen legt man daher jedes ihrer beiden Enden in den Winkel, welcher durch die Peripherien zweier Räder BB gebildet wird, die dicht neben einander aufgestellt sind, ohne sich jedoch zu berühren. Wenn sich die Rolle dreht, so rollt ihre Achse auf den vier Rädern BB, ohne dadurch ihre Lage zu verändern, wobei sich natürlich diese Räder drehen müssen. Das Gleiten, welches stattfinden müsste, wenn die Achse auf zwei Lagern aufruhen würde, wird auf diese Weise durch ein Rollen ersetzt, und der Widerstand, welchen die Rolle A erfährt, dadurch viel geringer gemacht. Zwar findet zwischen den Achsen der Räder BB und ihren Lagern doch eine gleitende Reibung statt, aber diese Reibung kann auf die Bewegung der Rolle nur einen fast unmerklichen Einfluss ausüben, da der Weg, welchen ihr Angriffspunkt während einer ganzen Umdrehung der Rolle A durchläuft, nur ausserordentlich klein ist; jedes der Räder B hat sich, wie man leicht sieht, erst einmal herumgedreht, nachdem die Rolle A so viele Umdrehungen gemacht hat, als die Zahl angibt, welche ausdrückt, wie oft der Durchmesser der Achse A in dem Durchmesser eines der Räder B enthalten ist. Um zu verhüten, dass die Achse A ihrer Länge nach über die Peripherien der Räder BB weggleitet, was die Versuche stören würde, lässt man diese Achse auf beiden Seiten in zwei feine Spitzen endigen (Fig. 278), welche sich gegen zwei kleine, vertikal stehende Ebenen von Stahl anlegen und dadurch gegen eine seitliche Verschiebung geschützt sind.

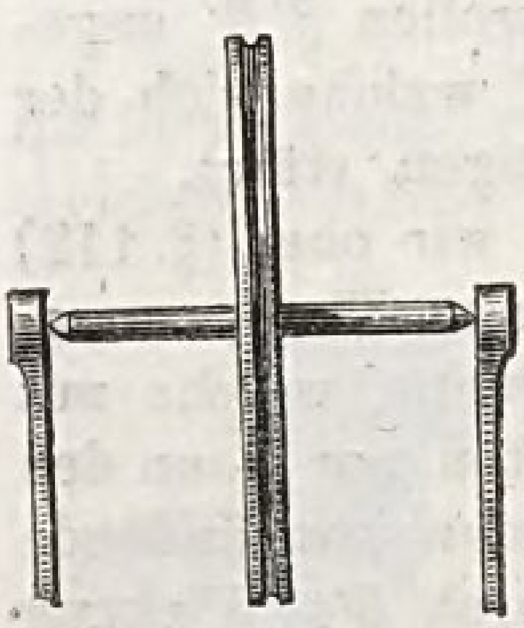


Fig. 278.

Als letztes Beispiel, wo das Gleiten durch ein Rollen ersetzt wird, nehmen wir die Aufhängeart, die bei grossen Glocken angewandt wird, um sie leicht beweglich zu machen. Die Fig. 279 zeigt diese Aufhängung von der grossen Glocke zu Metz, an welcher dieselbe schon seit vier Jahrhunderten besteht. Die Krone

dieser Glocke trägt zwei cylindrische Zapfen, um welche die Glocke beim Läuten gedreht werden muss. Wenn diese Zapfen in gewöhnlichen Lagern ruhen würden, so würde dadurch eine Reibung entwickelt werden, welche eine bedeutende Kraft zur Bewegung der Glocke erfordern würde. Anstatt dessen hat man desshalb jeden Zapfen auf ein eigenthümlich gestaltetes Stück A gelegt, welches um seinen unteren Stützpunkt a beweglich ist und oben in seinem mittleren Theil durch einen Kreisbogen begrenzt wird, dessen Mittelpunkt jener Stützpunkt a ist. Wenn die Glocke in Bewegung gesetzt wird, so rollt der Zapfen auf diesem Stück A, welches sich zu gleicher Zeit um den Punkt a dreht. Es neigt sich also dieses Stück bald zur Rechten, bald zur Linken, je nachdem die Glocke selbst nach rechts oder links schwingt. Um den Zapfen immer senkrecht über dem Unterstützungspunkt des Stückes A zu erhalten, hat man zu beiden Seiten desselben zwei Stücke B, C angebracht, welche seine seitliche Verschiebung verhindern sollen. Wenn diese Stücke fest wären, so würde sich offenbar an ihnen eine gleitende Reibung des Zapfens geltend machen; man hat desshalb diesen Stücken eine ähnliche Gestalt wie dem Stücke A gegeben und sie um die Punkte b, c beweglich gemacht, sodass auch hier noch das Gleiten des Zapfens auf ihrer Oberfläche durch ein Rollen ersetzt wird. Während sich der Zapfen stets auf das Stück A stützt, entwickelt sich zwischen beiden eine Reibung, welche hinreichend gross ist, um zu veranlassen, dass sich das Stück zu gleicher Zeit mit dem Zapfen dreht; und wenn die Glocke in Ruhe ist, so ruht der Zapfen immer auf der Mitte des Bogens, welcher den obersten Theil von A begrenzt. Aber für die beiden Stücke B, C ist dies nicht immer vorauszusetzen; der Zapfen legt sich abwechselnd bald gegen das eine, bald gegen das andere stärker an und man kann nicht darauf zählen, dass sie durch die Reibung zwischen ihren Oberflächen und dem Zapfen fortwährend in der richtigen Lage erhalten werden. Desshalb werden diese Stücke

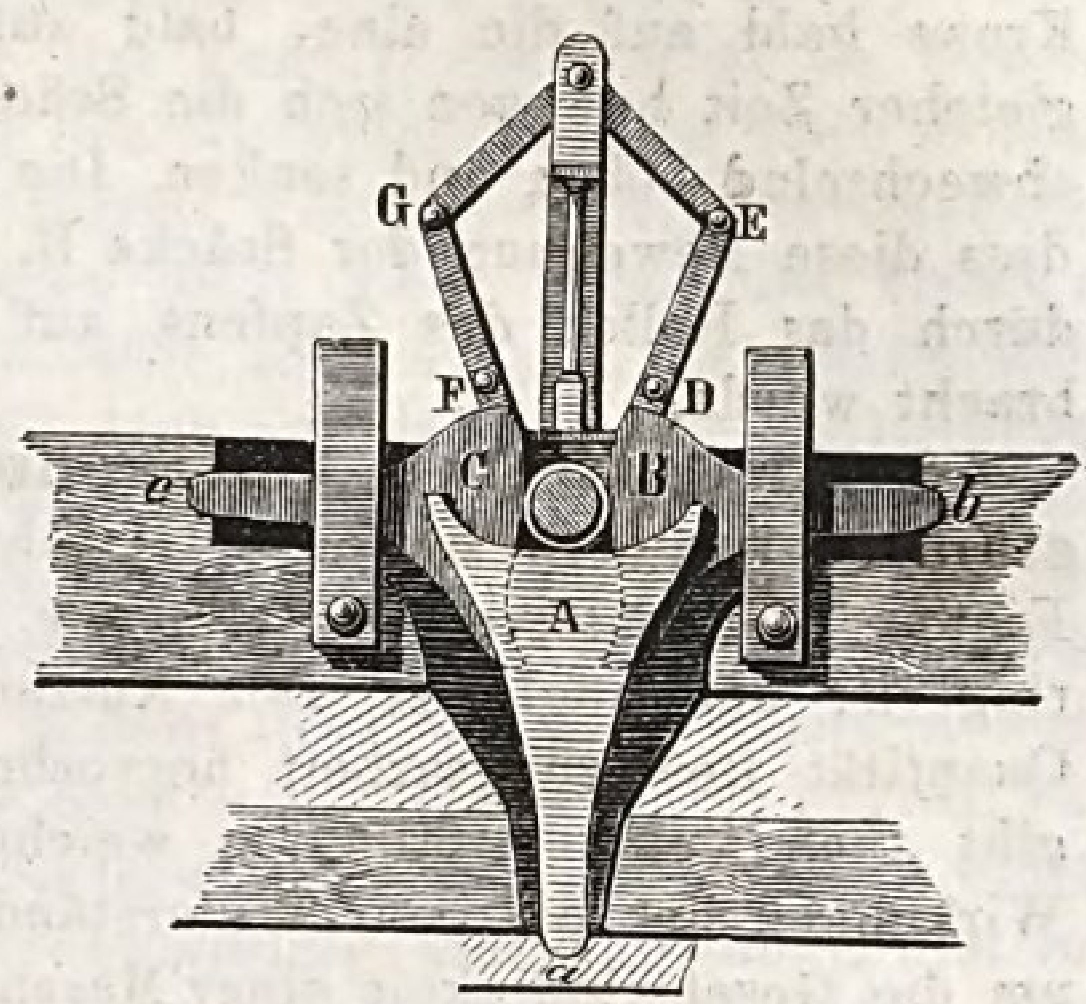


Fig. 279.

durch die Stäbe DE, FG gehalten, welche einestheils in D und F an diesen Stücken, anderntheils in E und G an dem obersten Theil der Krone der Glocke so befestigt sind, dass sie sich in allen diesen 4 Punkten frei drehen können. Während der Schwingungen der Glocke neigt sich das oberste Ende ihrer Krone bald auf die eine, bald auf die andere Seite, und zu gleicher Zeit bewegen sich die Stücke B und C, indem sie sich abwechselnd heben und senken. Die Einrichtung ist so getroffen, dass diese Bewegung der Stücke B, C dieselbe ist, als wenn sie durch das Rollen des Zapfens auf ihrer Oberfläche hervorgebracht würde.

§. 181. **Mittel, um den Einfluss der passiven Widerstände zu vermehren.** — Gewöhnlich muss man suchen, den Einfluss der passiven Widerstände so gut als möglich zu verringern, um möglichst viel Nutzarbeit mit einer gegebenen Quantität Bewegungsarbeit hervorbringen zu können; aber es gibt auch Ausnahmsfälle, in welchen man im Gegentheil die Wirkungen der passiven Widerstände vermehren muss, sei es, um die Geschwindigkeit einer Maschine zu mässigen, sei es, um sie ganz zur Ruhe zu bringen. Man erreicht dies am besten dadurch, dass man Reibungswiderstände hervorbringt, welche bei dem gewöhnlichen Gang der Maschine nicht vorhanden sind. Die Stücke, welche dazu bestimmt sind, diese Reibungswiderstände zu erzeugen, werden im Allgemeinen mit dem Namen Bremsen bezeichnet. Wir begnügen uns für den Augenblick damit, als Beispiel hiefür die Bremse zu beschreiben, welche man gewöhnlich an den Krahnen anbringt, um die Bewegung des Räderwerks in dem Fall zu mässigen, wo man die emporgehobene Last wieder herablassen will, ohne dass man genöthigt ist, fortwährend die Kurbel zurückzuhalten. Diese Bremse besteht aus einem Streifen Blech (Fig. 280), welcher eine cylindrische Trommel, die seitwärts an einem der Zahnräder angebracht ist, beinahe vollständig umfasst. Man sieht diese Trommel in Fig. 133, S. 163; sie befindet sich links von dem Rade F, mit welchem sie gewöhnlich aus einem Stück gegossen ist. Die beiden Enden des Blechstreifens sind an den Enden B, C (Fig. 280) der beiden

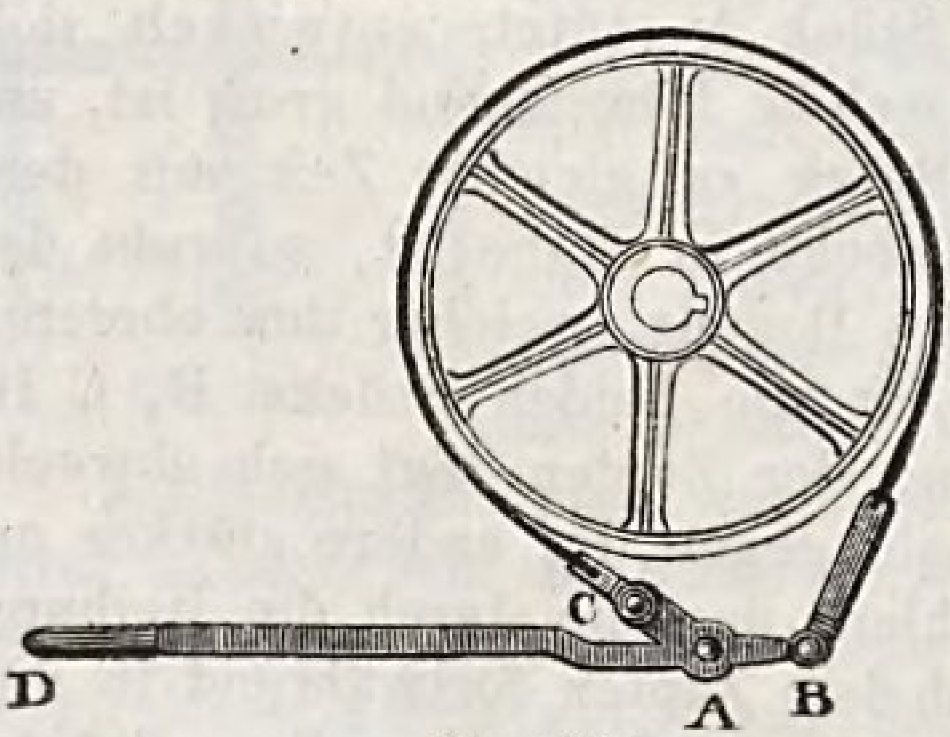


Fig. 280.

kleinen Arme einer Art von dreiarmigem Hebel BCD befestigt, welcher sich um den festen Punkt A drehen kann. Wenn man den grossen Arm dieses Hebels hebt, so wird der Blechstreifen gegen die Oberfläche der Trommel, über welche er gelegt ist, angedrückt, und wenn sich diese Trommel dreht, so entwickelt sich dadurch eine Reibung, welche um so grösser ist, je mehr Kraft man anwendet, um das Ende D des Hebels zu heben. Wenn diese Reibung nicht hervorgebracht werden soll, so lässt man den grossen Arm des Hebels wieder zurückfallen; in Folge dessen wird der Blechstreifen nicht mehr gegen die Trommel angedrückt, und wenn er dieselbe auch noch in einigen Punkten berührt, so entsteht dadurch doch nur eine sehr geringe Reibung. Die ganze Zeit hindurch, während welcher man die Kurbel des Krahns dreht, um eine Last emporzuheben, ist die Bremse nicht in Thätigkeit; wenn dann diese Last, nachdem sie emporgehoben, durch die Umdrehung des Krahns über die Stelle gebracht worden ist, wo man sie niederlassen will, lässt man die Kurbel los; die Last sinkt in Folge ihres Gewichtes von selbst herab, wobei sie die Zahnräder in entgegengesetzter Richtung dreht, und indem man auf die Bremse wirkt, sorgt man dafür, dass ihre Geschwindigkeit nicht über eine gewisse Grenze hinaus wächst, wozu blos nöthig ist, dass die sich entwickelnde Reibung der Last das Gleichgewicht hält.

Wir werden später Gelegenheit finden, noch andere Bremsen anzugeben, welche dazu bestimmt sind, ähnliche Wirkungen hervorzubringen wie diejenigen, welche wir eben beschrieben haben.

Wenn an einer Maschine ein Stück vorhanden ist, das auf einem andern rollt, so benützt man es manchmal, um, wo es nöthig ist, die passiven Widerstände zu vermehren. Zu dem Ende verhindert man dieses Stück zu rollen; es kann dann seine Bewegung nur dadurch fortsetzen, dass es gleitet, und es wird also dadurch der Widerstand des Rollens in den viel grösseren Widerstand des Gleitens verwandelt. Dies ist z. B. der Zweck des Radschuhes an den Wägen.

§. 182. Um ein ebenfalls hieher gehöriges Mittel, welches einen sehr grossen Widerstand rasch hervorzubringen gestattet, verständlich machen zu können, müssen wir vorerst die Reibung etwas näher betrachten, welche zwischen einem feststehenden Cylinder und einem Seil stattfindet, das auf seiner Oberfläche gleitet.

Es sei AE (Fig. 281) der Theil des Umfangs eines Cylinders, auf welchem ein Seil in der Richtung des Pfeils gleitet. An diesem Seile wirke einerseits im Sinne der Bewegung eine Kraft P,

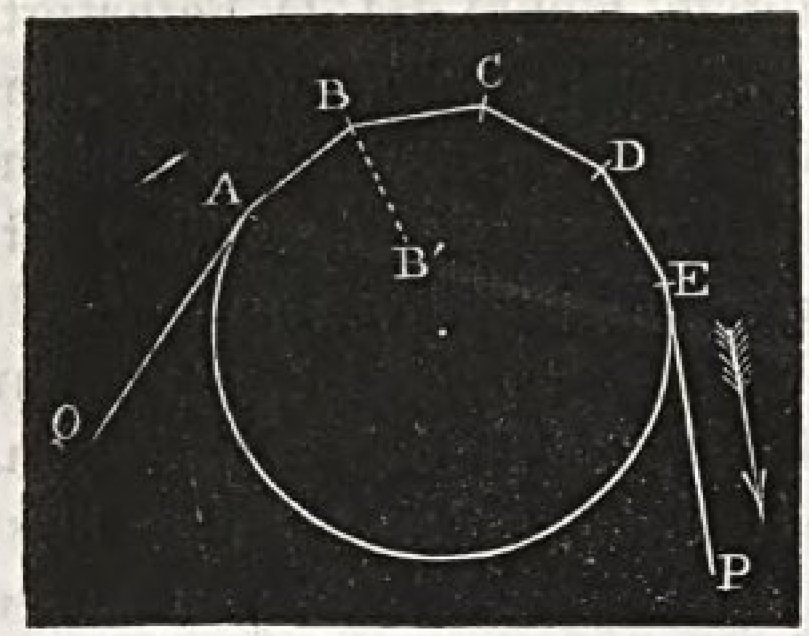


Fig. 281.

andererseits eine Kraft Q im entgegengesetzten Sinne, welche sich der Bewegung widersetzt. Damit diese Bewegung gleichförmig ist, muss die Kraft P gleich der Kraft Q, vermehrt um die ganze Reibung sein, welche sich längs des Bogens AE entwickelt. Um einzusehen, wie diese Reibung entsteht, denken wir uns den Bogen AE in mehrere gleiche Theile AB, BC getheilt, die so klein sind, dass sie als gerade Linien betrachtet werden können; der Bogen AE wird dadurch einem Theil eines Polygons ähnlich, auf welchem das Seil gleitet. In irgend einer Ecke B endigen zwei Seilstücke BC, BA, deren Spannungen um die Grösse der Reibung, welche an diesem Punkt selbst entwickelt wird, von einander verschieden sind. Diese beiden Spannungen haben eine Mittelkraft, die nach einer Linie BB′ gerichtet ist, die streng genommen etwas seitwärts vom Mittelpunkt des Cylinders vorbeigeht. Da aber die Verschiedenheit dieser Spannungen nur sehr wenig beträgt, so kann man ihre Resultante so ansehen, als ob sie in dem Punkte B normal auf dem Umfang des Cylinders stünde, und kann sie daher als den Druck betrachten, welcher die Reibung in dem Punkte B bestimmt. Man sieht daraus, dass sich die Spannung des Seils von dem Punkt A an, wo sie gleich Q ist, bis zu dem Punkte E, wo sie gleich P wird, fortwährend vermehrt; es ist aber klar, dass diese Vermehrung nicht gleichmässig, d. h. auf gleiche Strecken gleichgross ist, weil die Reibung selbst wieder in jedem Punkte um so grösser wird, je mehr die Spannung in diesem Punkte wächst.

Um das Gesetz zu finden, nach welchem sich die Spannung des Seils in dem Theil seiner Länge, welcher sich um den Umfang des Cylinders herumlegt, verändert, wollen wir zunächst annehmen, dass, während der Berührungsbogen AE (Fig. 281) derselbe bleibt, der Widerstand Q doppelt so gross werde. Dann ist unschwer einzusehen, dass die Kraft P nur dann der neuen Kraft Q das Gleichgewicht halten kann, wenn sie ebenfalls verdoppelt wird. Denn wenn wir zu dem zurückkehren, was wir soeben über die Entstehungsart der Reibung zwischen dem Seil und der Oberfläche des Cylinders gesagt haben und annehmen, dass AB die erste der Seiten des Polygons ist, durch welches wir uns den Bogen AE ersetzt denken, so ist die Spannung des

Seilstückes AB gleich Q. Wenn also Q verdoppelt wird, so wird die nach BB′ gerichtete Mittelkraft, von der wir angenommen haben, dass ihre Richtung durch den Mittelpunkt des Kreises geht, ebenfalls verdoppelt und mit ihr die im Punkte B entstehende Reibung. Die Spannung des Seilstücks BC ist aber gleich der Summe der Spannung in AB und der im Punkte B entwickelten Reibung, sie wird also gleichfalls doppelt so gross als vorher. Ganz ähnlich lässt sich nun für den Punkt C und dann auch für den Punkt D u. s. w. die Verdoppelung der Reibung, sowie für die Seilstücke CD und dann DE u. s. w. die Verdoppelung ihrer Spannung nachweisen, woraus eben folgt, dass P doppelt so gross werden muss, wenn Q verdoppelt wird. Wenn die Kraft Q dreimal, viermal etc. so gross genommen wird, so muss natürlich auch die Kraft P dreimal, viermal etc. so gross genommen werden, damit nach wie vor Gleichgewicht zwischen diesen beiden Kräften besteht.

Es sei nun AD (Fig. 282) der ganze Bogen, welcher von einem Seil umfasst wird, das über einen Cylinder gleitet. Theilen wir diesen Bogen in drei gleiche Theile AB, BC, CD. Der Theil AB des Seils befindet sich offenbar ganz unter denselben Umständen, als wenn sich das Seil, welches in A anfängt, sich um den Cylinder zu legen, in B in der Richtung der Tangente BB′ wieder von demselben entferne und in diesem Theile unter der Wirkung einer Kraft stünde, welche gleich der Spannung in dem Punkt B ist. Ebenso verhält sich das Seilstück BC, als wenn sich das Seil, in B anfangend, sich um den Cylinder zu legen, in C wieder davon entfernte und in B″ und C′ Kräften unterworfen wäre, welche bezüglich gleich den Spannungen in den Punkten B und C sind. Endlich können wir auch den Theil CD so betrachten, als wenn er einem Seil angehörte, welches in C anfängt, sich um den Cylinder zu legen und in D sich von demselben entfernt, und welches an seinem einen Ende C″ einer Kraft gleich der Spannung in C und an seinem andern Ende der Kraft P ausgesetzt wäre. Nehmen wir der einfacheren Darstellungsweise halber an, dass die Reibung, welche sich längs des Bogens AB entwickelt,

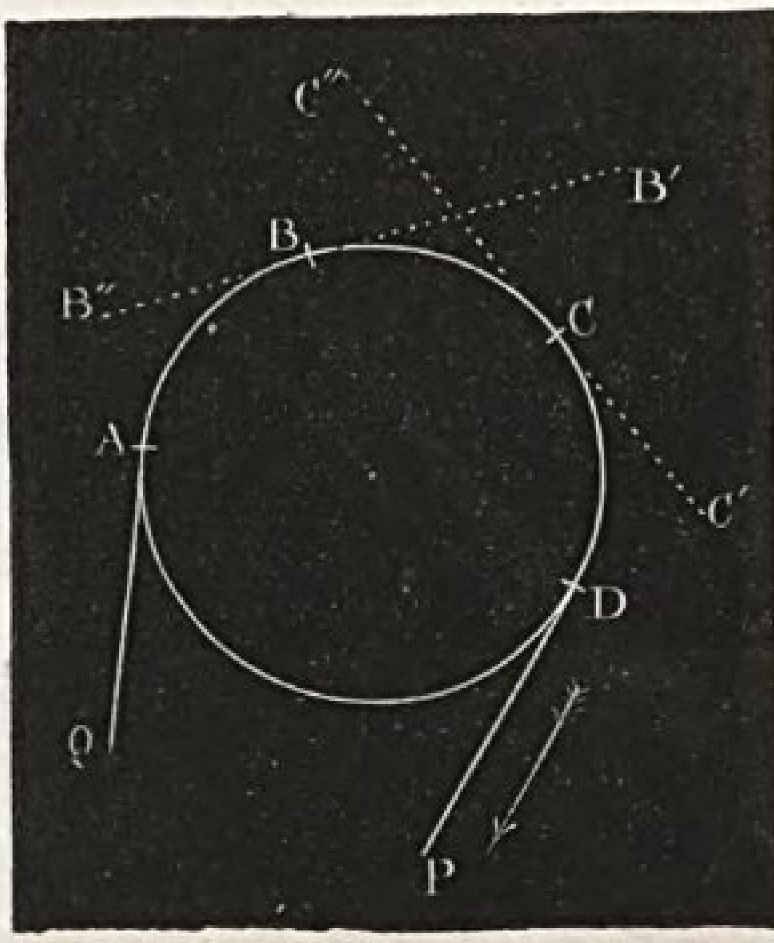


Fig. 282.

gerade gleich der Kraft Q sei, so muss die nach BB' wirkende Kraft, die Spannung im Punkte B, doppelt so gross als Q sein, um dieser Reibung sammt dem Widerstande Q das Gleichgewicht zu halten. Die in B'' an dem Seil B''BCC' wirkende Kraft ist also doppelt so gross als Q; nun ist der Bogen BC genau derselbe als der Bogen AB; es folgt also, dass die in C' wirkende Kraft ebenfalls doppelt so gross als die in B'' wirkende sein muss, d. h. dass diese Kraft, oder besser die Spannung in dem Punkte C, viermal so gross als die Kraft Q ist. Wenn aber die Kraft in C'' viermal so gross als Q ist, so kann ihr nach den nämlichen Schlüssen die Kraft P nur dann das Gleichgewicht halten, wenn sie das achtfache von Q beträgt. Kurz zusammengefasst können wir also sagen: Wenn wir auf dem um den Cylinder gewickelten Theil des Seils die Punkte B, C, D . . . so nehmen, dass ihre Entfernungen von dem Punkte A, längs des Seils im Bogen gemessen, in arithmetischer Progression wachsen, so wachsen die Spannungen des Seils in diesen verschiedenen Punkten wie die Glieder einer geometrischen Progression. Wenn also ein Seil, welches einem und demselben Widerstande unterworfen ist, den Cylinder nach und nach in Bögen umfasst, welche wie die Glieder einer arithmetischen Progression wachsen, so muss die Kraft P, welche jenem Widerstande das Gleichgewicht halten soll, Werthe erhalten, welche wie die Glieder einer geometrischen Progression zunehmen. Setzen wir z. B. voraus, dass an einem Seil, indem es den Bogen AB (Fig. 283) umfängt, die Kraft P dreimal so gross als der Widerstand Q sein muss, um ihm das Gleichgewicht zu halten, so muss sie neunmal so gross sein als dieser Widerstand in dem Fall, wo das Seil den Cylinder in einem doppelt so grossen Bogen AC berührt, und 27mal so gross, wenn der vom Seil umfangene Bogen AD 3mal so gross als AB ist, u. s. f. Man sieht daraus, wie schnell die Kraft P wächst, wenn die Grösse der Bögen, in welchen das Seil den Cylinder berührt, zunimmt.

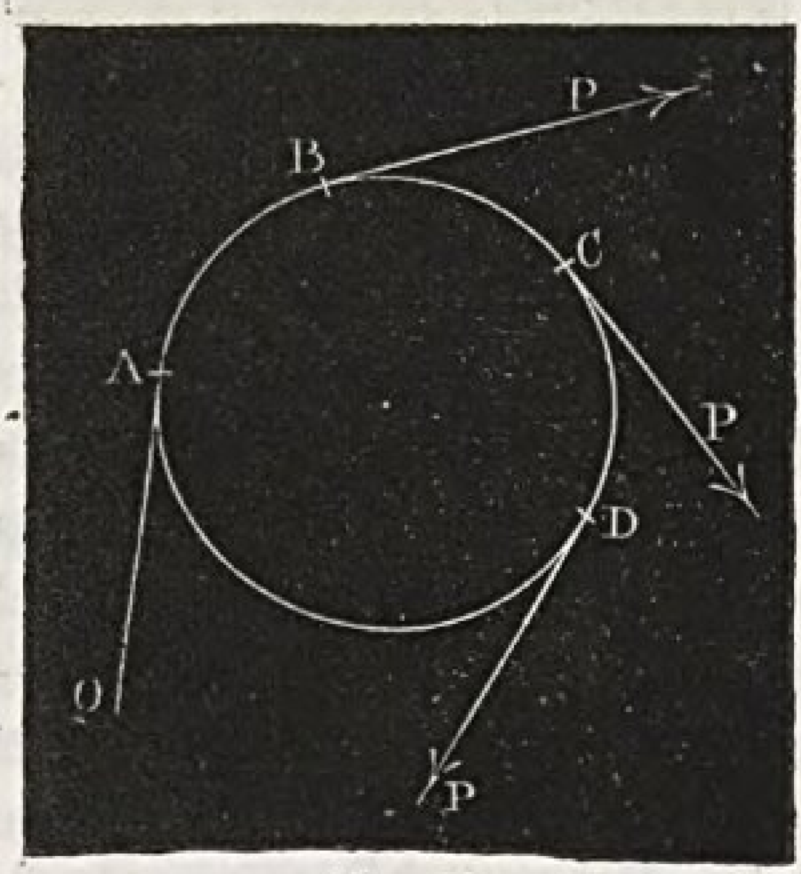


Fig. 283.

Ausserdem ist leicht einzusehen, dass die Kraft P, welche einem bestimmten Widerstand Q das Gleichgewicht halten soll, um so grösser werden muss, je kleiner bei derselben Länge des Berührungsbogens der Durchmesser des Cy-

linders wird. Denn wenn man diesen Berührungsbogen allemal durch ein Polygon ABCDE (Fig. 281) von gleichviel Seiten ersetzt, so werden die Winkel ABC, BCD, CDE zwischen diesen Seiten um so kleiner, je kleiner der Durchmesser des Cylinders wird. Je kleiner aber diese Winkel werden, desto grösser wird die nach BB′ gerichtete Mittelkraft zweier aufeinander folgender Spannungen in AB und BC, desto grösser wird also die Reibung in den Eckpunkten B, C, D des Polygons.

§. **183.** Man benützt die Grösse der bei dem Gleiten eines Seils über einen feststehenden Cylinder entwickelten Reibung häufig, um einer Bewegung, welche man mässigen oder ganz einhalten will, einen bedeutenden Widerstand entgegenzusetzen. Um z. B. ein Schiff, welches sich einen Fluss hinabbewegt, anzuhalten, wickelt man ein Seil, dessen eines Ende am Schiffe befestigt ist, zwei- oder dreimal um ein cylindrisches Stück Holz, welches vertikal in der Erde steht (Fig. 284). Wenn dann an

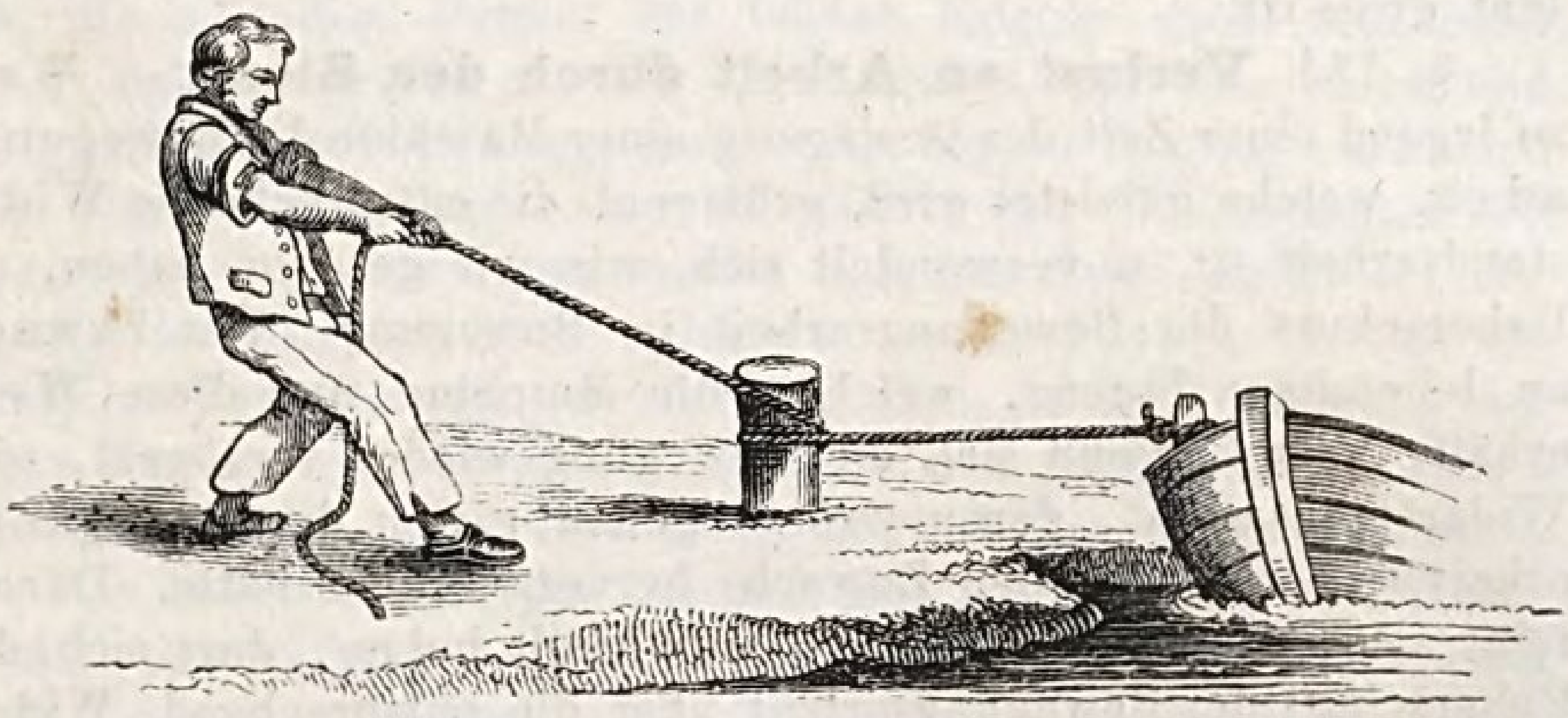


Fig. 284.

dem freien Ende des Seils mit einer verhältnissmässig nur geringen Kraft gezogen wird, so wird das Schiff in Folge des grossen Widerstandes, welcher sich dem Gleiten des Seils über die Oberfläche des Cylinders entgegensetzt, in seiner Bewegung mehr und mehr verzögert und endlich ganz zum Stillstand gebracht. Nehmen wir an, es sei das Seil nur einmal um den Cylinder gewickelt und es werde von Seite des Schiffes, um es gleiten zu machen, eine fünfmal so grosse Zugkraft ausgeübt als der Widerstand beträgt, welchen der Mann leistet, der das freie Ende des Seils in Händen hat; dann folgt aus dem, was im vorhergehenden Paragraphen entwickelt wurde, dass jene Zugkraft 25 mal so gross als dieser Widerstand sein muss, wenn das Seil zweimal, und 125 mal so gross, wenn es dreimal herum-

gewickelt wird. Aber wenn das Schiff eine gewisse Zugkraft auf das Seil ausübt, so wirkt dieses umgekehrt wieder auf das Schiff und setzt der Bewegung desselben einen Widerstand gleich dieser Zugkraft entgegen. Man begreift also, wie durch das Mittel, welches wir oben angegeben haben, ein geringer Widerstand, der an dem freien Ende des Seils angebracht wird, einen ausserordentlich grossen Widerstand gegen die Bewegung des Schiffs veranlassen kann.

Bei der Beschreibung der Erdwinde (Seite 145) haben wir gesagt, dass man das Tau, anstatt es an der Oberfläche des Cylinders fest zu machen, zwei- oder dreimal um denselben herumwickelt und alsdann an seinem freien Ende eine hinreichend grosse Zugkraft anbringt, um sein Gleiten über den Cylinder zu verhindern. Man begreift jetzt, dass diese Zugkraft nur von geringer Grösse zu sein braucht, um ihren Zweck zu erfüllen, selbst wenn die Last, welche die Erdwinde zu überwinden hat, sehr gross ist.

§. 184. **Verlust an Arbeit durch den Stoss.** — Wenn zu irgend einer Zeit der Bewegung einer Maschine die Bewegungsarbeit, welche geleistet wird, grösser als die entsprechende Widerstandsarbeit ist, so verwandelt sich, wie wir gesehen haben, der Ueberschuss der Bewegungsarbeit in Bewegung. Der Zuwachs an lebendiger Potenz, welchen die Maschine auf diese Weise erhält, leistet, wenn sich die Bewegung wieder verzögert, eine Widerstandsarbeit, deren Grösse genau gleich der Bewegungsarbeit ist, welche jenen Zuwachs hervorgebracht hatte. Daraus folgt also, wie wir schon oben entwickelt haben, dass sich der Ueberschuss der Bewegungsarbeit über die entsprechende Widerstandsarbeit während einer gewissen Zeit in der Maschine in Form von Bewegung ansammelt, um später, wenn sich Gelegenheit gibt, wieder vollständig benützt zu werden. Um also zu verhindern, dass an Arbeit verloren geht, ist es unerlässlich, die Bewegung der Maschine so gut als möglich zu erhalten, zu verhüten, dass ein Theil derselben zerstört wird, ohne dass er die Wirkung ausgeübt hat, welche damit erreicht werden sollte. Dies ist der Grund, warum man mit möglichster Sorgfalt vermeiden muss, dass zwischen den verschiedenen in Bewegung befindlichen Theilen einer Maschine Stösse stattfinden. Um die Schädlichkeit dieser Stösse einleuchtend zu machen, müssen wir etwas näher darauf eingehen.

Denken wir uns, dass eine Bleikugel A, welche eine gewisse Geschwindigkeit besitzt, gegen eine andere ruhende Bleikugel B

von derselben Masse stosse. Nach dem, was wir oben (§. 156) gesehen haben, bewegen sich diese beiden unelastischen Massen nach dem Stoss mit einer gemeinschaftlichen Geschwindigkeit, gleich der Hälfte von derjenigen, welche die Kugel A vor dem Stoss besass, mit einander fort. Nun ist die lebendige Potenz, welche die Kugel A vor dem Stoss besass, gleich dem halben Product aus ihrer Masse in das Quadrat ihrer Geschwindigkeit; ebenso ist die lebendige Potenz der beiden, nach dem Stoss mit einander fortgehenden Kugeln gleich dem halben Product aus ihrer Gesammtmasse, die doppelt so gross als die der Kugel A ist, in das Quadrat ihrer gemeinschaftlichen Geschwindigkeit. Diese gemeinschaftliche Geschwindigkeit ist aber nur halb so gross als die der Kugel A vor dem Stoss, ihr Quadrat also viertel so gross als das Quadrat dieser. In dem letzteren Product wird folglich eine doppelt so grosse Masse mit einer viertel so grossen Zahl multiplicirt, es ist daher blos halb so gross als das erste, d. h. die lebendige Potenz der beiden Kugeln nach dem Stoss ist nur halb so gross, als die der Kugel A vor dem Stoss, und es wird daher die Bewegung, welche die beiden Kugeln zusammen nach dem Stoss besitzen, nur die Hälfte der Widerstandsarbeit zu leisten im Stande sein, welche vor dem Stoss durch die Bewegung der Kugel A hätte geleistet werden können. Durch die plötzliche Veränderung, welche der Stoss in der Bewegung der beiden Kugeln hervorbrachte, hat man also die Hälfte der Arbeit verloren, welche diese Bewegung hervorbringen hätte können.

Wir haben soeben als Beispiel den Stoss zweier vollständig unelastischer Körper betrachtet und gefunden, dass er immer einen Verlust an Arbeit nach sich zieht. Das Resultat würde aber ganz anders ausgefallen sein, wenn wir statt zweier Bleikugeln zwei Elfenbeinkugeln genommen hätten. Wir wissen, dass in diesem Fall die Kugel A, wenn sie mit einer gewissen Geschwindigkeit gegen die ruhende Kugel B von derselben Masse stösst, stehen bleibt und ihre ganze Geschwindigkeit auf die Kugel B überträgt (§. 157). Die Bewegung, welche nach dem Stoss stattfindet, ist folglich im Stande, genau dieselbe Quantität von Widerstandsarbeit zu leisten als diejenige vor dem Stoss, sodass also im Falle eines Stosses zwischen vollkommen elastischen Körpern kein Verlust an Arbeit stattfindet.

Es ist leicht einzusehen, woher die Verschiedenheit dieser Wirkungen rührt. Bei dem Stosse zweier Bleikugeln entsteht eine Gestaltsveränderung derselben, welche ihnen nach dem Stoss bleibt. Dieser Gestaltsveränderung widersetzen sich die Mole-

külarkräfte, woraus also eine gewisse Quantität von Widerstandsarbeit folgt, die geleistet werden muss; diese Widerstandsarbeit ist genau gleich dem Verlust an Arbeit, welchen wir vorhin nachgewiesen haben. Im Falle des Stosses zwischen zwei Elfenbeinkugeln findet zuerst auch eine Gestaltsveränderung statt, aber in Folge ihrer Elasticität nehmen die beiden Kugeln ihre ursprüngliche Gestalt vollständig wieder an. Die zuerst stattfindende Verschiebung der Moleküle aus ihrer Gleichgewichtslage verursacht eine Widerstandsarbeit, aber indem diese Moleküle die Stellungen, welche sie vorher hatten, wieder einzunehmen suchen, entwickeln sie eine Bewegungsarbeit, welche genau gleich jener Widerstandsarbeit ist. Der erste Theil des Stosses, während dessen die Gestaltsveränderung der Körper immer grösser und grösser wird, ist von einem Verlust an Arbeit begleitet, welcher eben so gross ist, als wenn die Körper vollkommen unelastisch wären; aber im zweiten Theil, während dessen die Gestaltsveränderung wieder verschwindet, ergibt sich ein Gewinn von Arbeit, welcher den vorhergehenden Verlust genau wieder aufwiegt, sodass der Stoss im Ganzen keinen Verlust an Arbeit verursacht.

Das, was wir in den beiden einfachen Beispielen, welche wir betrachteten, gefunden haben, gilt in allen Fällen, wo durch den Stoss von Körpern plötzliche Aenderungen, entweder in der Geschwindigkeit ihrer Bewegung allein, oder auch in der Richtung derselben hervorgebracht werden. Der Stoss zwischen zwei unelastischen Körpern veranlasst immer einen Arbeitsverlust, welches auch die Gestalt der Massen dieser beiden Körper ist, und welches auch die Umstände sind, unter denen er stattfindet. In gleicher Weise hat der Stoss zwischen irgend zwei vollkommen elastischen Körpern niemals einen Verlust an Arbeit zur Folge.

Die Stücke, zwischen welchen bei einer Maschine Stösse vorkommen können, gehören im Allgemeinen weder unter die eine, noch unter die andere Klasse der Körper, von denen wir oben gesprochen haben; sie sind weder vollkommen unelastisch, noch vollkommen elastisch. Schon daraus folgt im Zusammenhalt mit dem Obigen, dass der Stoss zwischen ihnen einen Verlust an Arbeit mit sich bringt, wenn derselbe auch nicht so gross ist als bei ganz unelastischen Körpern. Aber ausserdem gehen in den meisten Fällen die Stösse zwischen den verschiedenen Maschinentheilen in Bezug auf den Arbeitsverlust beinahe ebenso vor sich, als wenn dieselben ganz unelastisch wären. Wenn die Körper, zwischen welchen der Stoss stattfindet, sich wieder von einander trennen, bevor die durch den Stoss hervorgebrachte

Gestaltsveränderung wieder verschwunden ist, und dies findet gewöhnlich statt, so ist klar, dass es von geringem Belang ist, ob die Gestaltsveränderung nachher noch wirklich verschwindet oder ob sie bleibt; die Bewegungsarbeit, welche die Moleküle in diesem Fall hervorbringen, indem sie ihre Gleichgewichtslage wieder annehmen, wird nur Vibrationen hervorbringen, welche sich nach und nach über die verschiedenen Theile der Maschine fortpflanzen und sich endlich ganz verlieren; diese Bewegungsarbeit kann in keiner Weise den Arbeitsverlust wieder aufwiegen, der durch die Gestaltsveränderung, welche die Körper erfahren haben, veranlasst wurde. Die Stösse in den Maschinen sind also immer von Arbeitsverlusten begleitet, man muss sie desshalb mit der grössten Sorgfalt vermeiden; und wo dies nicht ganz möglich ist, muss man es wenigstens so einrichten, dass die sich stossenden Körper einen möglichst grossen Grad von Elasticität besitzen.

Es gibt noch einen andern wichtigen Grund, die Entstehung von Stössen möglichst zu verhindern. Dieser besteht darin, dass die Vibrationen, welche diese Stösse hervorbringen, Erschütterungen der Maschine veranlassen, welche dieselbe einer schnellen Abnützung entgegenführen und zahlreiche Reparaturen nöthig machen.

§. 185. **Das Carnot'sche Princip.** — Bei der Entwicklung des Princips der Erhaltung der lebendigen Potenz (§. 152) wurde vorausgesetzt, dass jedes Molekül des bewegten Körpers seine Bewegung am Anfang eines Zeittheilchens mit derselben Geschwindigkeit fortsetzt, welche es zu Ende des vorhergehenden hatte, und dass nur durch die bewegenden Kräfte selbst im Verlaufe des folgenden Zeittheilchens Aenderungen dieser Geschwindigkeit in Grösse und Richtung allmählich hervorgebracht werden. In diesem Fall ist dann der Ueberschuss der Bewegungsarbeit der wirkenden Kräfte über die Widerstandsarbeit gleich der Vermehrung der lebendigen Potenz des Körpers.

Wenn aber durch äussere Einflüsse, Stösse z. B., plötzliche Geschwindigkeitsänderungen der Grösse oder Richtung oder beider zugleich nach vorkommen, so ist jenes Princip nicht mehr richtig. Es treten Verluste an lebendiger Potenz, also an Arbeit ein, die wir nun, wie im vorigen Paragraphen in einzelnen speziellen Fällen, so jetzt allgemein bestimmen wollen.

Sei A (Fig. 285) ein Molekül des Bewegten und AB der Grösse und Richtung nach seine Geschwindigkeit zu Ende des unmittelbar vorhergegangenen Zeittheilchens. Mit Anfang des

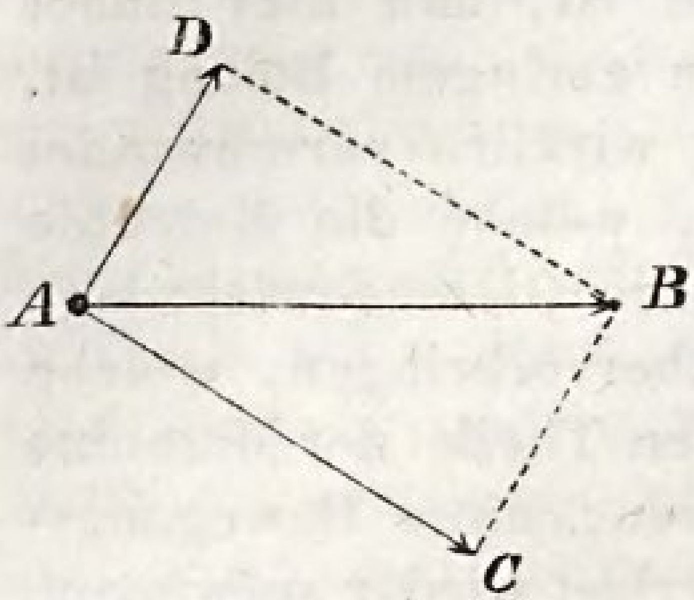


Fig. 285.

nächstfolgenden erhalte das Molekül plötzlich die Geschwindigkeit A C. Nun kann man sich über AB als Diagonale und AC als einer Seite ein Parallelogramm beschrieben denken, dessen andere Seite AD ist. Um die Geschwindigkeit AB in die AC überzuführen, können wir uns eine Kraft wirkend denken, welche in der, der Geschwindigkeit AD gerade entgegengesetzten Richtung wirkend, diese Geschwindigkeit vernichtet, und also eine Arbeit gleich dem halben Product aus der Masse des Moleküls in das Quadrat dieser Geschwindigkeit leistet. Diese Arbeit ist offenbar verloren, wie man auch die Geschwindigkeit AD verloren nennen kann. Es geht daher durch eine solch' plötzliche Geschwindigkeitsänderung eines Körpers eine Arbeit verloren, welche gleich ist der Summe der Produkte aus den halben Massen der einzelnen Moleküle in das Quadrat der auf obigem Wege gefundenen verlorenen Geschwindigkeiten. Dies ist das nach seinem Erfinder sog. *Carnot*'sche Princip (1784).

Bezeichnet man mit v_2 diese verlorenen Geschwindigkeiten und behält im Uebrigen die Bezeichnung des §. 152 bei, so ist das durch das *Carnot*'sche vervollständigte Princip der Erhaltung der lebendigen Potenz ausgedrückt durch die Formel:

$$A - W = \Sigma \tfrac{1}{2} m v'^2 - \Sigma \tfrac{1}{2} m v^2 + \Sigma \tfrac{1}{2} m v_2^2.$$

Wenn die Bewegung der einzelnen Moleküle des Körpers in stetigen Curven vor sich geht, so ändern sich zwar von Augenblick zu Augenblick die Richtungen seiner Geschwindigkeit auch, aber der Winkel BAC (Fig. 285) zwischen zwei aufeinander folgenden solchen Richtungen ist so klein und in Folge dessen die verlorene Geschwindigkeit so gering, dass ein merklicher Verlust an Arbeit dadurch nicht entsteht.

§. 186. **Allgemeine Schlussfolgerungen aus dem Vorhergehenden.** — Wenn wir noch einmal überblicken, was über die Maschinen im Zustande der ungleichförmigen Bewegung gesagt wurde, so können wir die erhaltenen Resultate kurz in Folgendem zusammenfassen:

1) Es ist nicht nothwendig, dass die bewegende Kraft fortwährend den Widerständen das Gleichgewicht hält; wenn zu gewissen Zeiten ein Ueberschuss von bewegender Kraft vorhanden

ist, so folgt daraus eine Vermehrung der Bewegung und damit eine Vergrösserung der lebendigen Potenz, welche später fähig ist, dieselbe Wirkung hervorzubringen, als jener Ueberschuss an Kraft selbst.

2) Wenn die bewegende Kraft und die Widerstände nicht fortwährend im Gleichgewicht sind, und folglich die Maschine zu gewissen Zeiten den Ueberschuss von Bewegungsarbeit über die Widerstandsarbeit in Form von Bewegung ansammeln muss, so bringt man ein Schwungrad an derselben an, welches dazu bestimmt ist, zu verhindern, dass die Geschwindigkeit zu grossen Aenderungen unterworfen wird.

3) Wenn durch fortgesetzte Anhäufung von Bewegung, hervorgebracht durch Ueberschüsse an Bewegungsarbeit, die Geschwindigkeit der Maschine zu gross werden könnte, so wendet man einen Centrifugal-Regulator an, welcher gestattet, auf die bewegende Kraft einzuwirken, um ihre Grösse zu reguliren, und auf diese Weise die Geschwindigkeit der Maschine zwischen bestimmten Grenzen zu erhalten.

4) Da die passiven Widerstände, welche sich bei der Bewegung einer Maschine entwickeln, einen Theil der bewegenden Kraft ohne nützliche Leistung absorbiren, so ist es nothwendig, die Maschine so einzurichten, dass der Einfluss derselben so viel als möglich vermindert wird.

5) Da endlich der Stoss zwischen zwei Körpern, die nicht vollkommen elastisch sind, immer von einem Verlust an Arbeit begleitet ist, so muss man ihn durch alle möglichen Mittel zu verhindern suchen; und wenn dies nicht erreicht werden kann, so muss man dafür sorgen, dass die sich stossenden Stücke möglichst vollkommen elastisch sind.

Nachdem wir nun in dem Vorhergehenden die wichtigsten Gesetze kennen gelernt haben, die zum Verständniss der Maschinen erforderlich sind, gehen wir dazu über, dieselben auf einige Beispiele anzuwenden, die unter den vielen, die hier aufgeführt werden könnten, das meiste Interesse darbieten dürften.

X. Anwendung der vorhergehenden Lehren auf die Betrachtung einiger Maschinen.

§. 187. **Mahlmühlen.** — Um aus den Körnern der Getreidearten, wie des Roggens, des Waizens u. s. f. das Mehl, welches sie enthalten, zu bekommen, zermalmt man dieselben

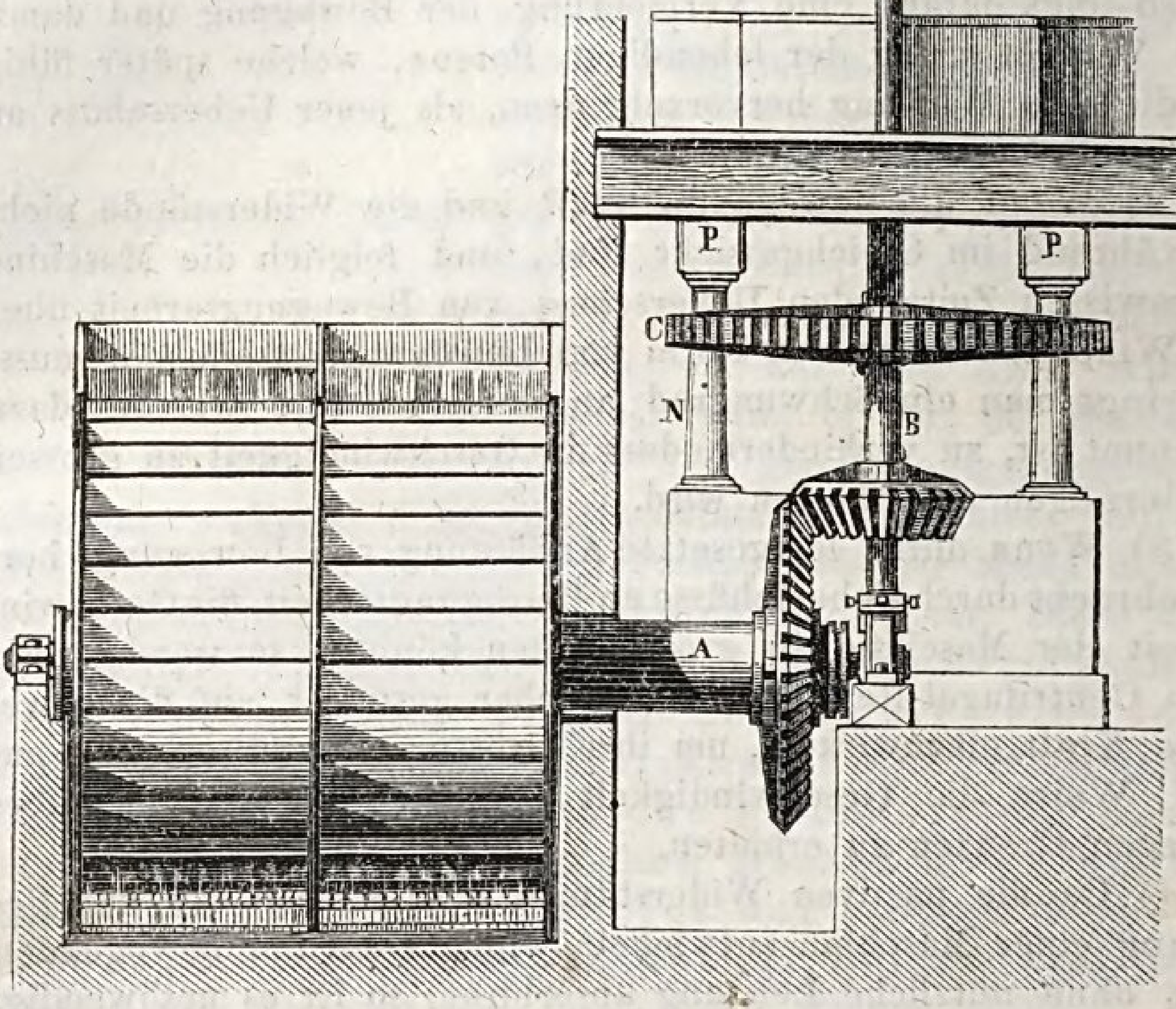


Fig. 286.

zwischen zwei passend zugerichteten Steinen. Dadurch wird die Hülse jedes der Körnchen zerrissen; ihre Bruchstücke, welche man mit dem Namen Kleie bezeichnet, mischen sich mit dem Mehl, das gleichzeitig erhalten wird; es bleibt also zuletzt noch übrig, sie von dem Mehle zu trennen, was am besten mittelst eines feinen Siebes geschieht, welches das Mehl durch seine Löcher hindurch lässt, während es die Kleie zurückhält. Diese Operationen werden in den Mahl- oder Getreidemühlen ausgeführt, und wir wollen nun die Einrichtung einer solchen Mühle etwas näher kennen lernen.

Die Steine, welche zum Mahlen der Getreidekörner dienen, wurden in sehr früher Zeit durch Menschen oder Thiere in Bewegung gesetzt; jetzt benützt man dazu immer die Kraft des Wassers oder des Windes oder auch des Dampfes. Die Figuren 286 und 287 zeigen die Einrichtung einer Wassermühle in ihren wesentlichsten Theilen. Durch die Kraft eines fliessenden Wassers, eines Baches oder Flusses, wird ein Wasserrad in Bewegung gesetzt. Auf die nähere Beschreibung eines solchen Rades und auf die Erklärung der Art und Weise, wie es durch das Wasser herumbewegt wird, werden wir später ausführlicher zurück-

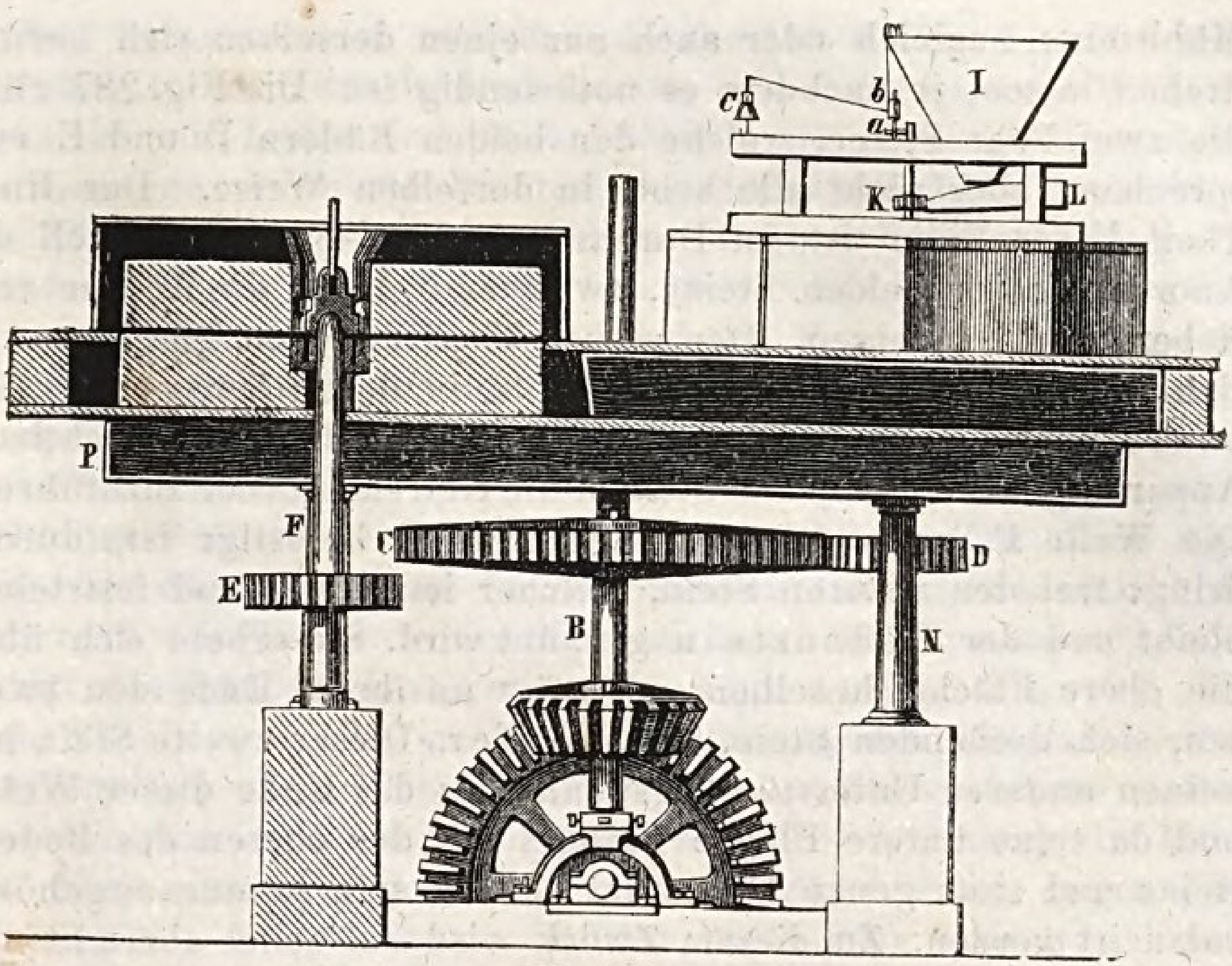


Fig. 287.

kommen. Vorläufig genügt es, anzugeben, dass sich die Welle A (Fig. 286) dieses Wasserrads in das Innere der Mühle hinein verlängert und ihre Rotationsbewegung mittelst eines Paars konischer Räder einer vertikal stehenden Welle B mittheilt. An dieser Welle B ist ein grosses horizontales Zahnrad C befestigt, und dieses Rad kann seine Bewegung durch Vermittelung anderer kleinerer Zahnräder D und E (Fig. 287) auf zwei Mühlsteine übertragen. Es können aber auch vier und sogar sechs Steine zugleich auf diese Art in Bewegung gesetzt werden. — Jedes der beiden Räder D und E kann längs der vertikalen Welle, an welcher es befestigt ist, verschoben werden; wenn es aber an die Stelle gebracht ist, an welcher es bleiben soll, so kann man es daselbst mittelst eines Keiles, welcher zwischen ihm und der Welle in einer eigens zu diesem Zweck an der letzteren angebrachten Nuth eingetrieben wird, festhalten. Auf diese Art können die Räder D und E auf gleiche Höhe mit dem grossen Rade C gestellt werden, um mit diesem einzugreifen, oder man kann sie unter dieses Rad herablassen und die Mittheilung der Bewegung dadurch unterbrechen. Die Fig. 287 zeigt das Rad D so gestellt, dass es sich mit dem Rade C herumdrehen muss, während das Rad E nicht in jenes Rad eingreift und folglich keine Bewegung erhält. Man kann also nach Belieben die beiden

Mühlsteine zugleich oder auch nur einen derselben sich herumdrehen lassen, je nachdem es nothwendig ist. Die Fig. 287 zeigt die zwei Paar Steine, welche den beiden Rädern D und E entsprechen, aber nicht alle beide in derselben Weise. Der linke Theil dieser Figur ist im Durchschnitt gezeichnet und soll die Anordnung der beiden Steine, zwischen welchen die Körner zerrieben werden, zeigen. Der rechte Theil dagegen gibt eine Ansicht der achteckigen Hülle von Holz, in deren Innern sich das zweite Paar der Steine befindet. Der über derselben sichtbare Apparat gehört dazu, den Steinen die Getreidekörner zuzuführen. Die Welle F, an welcher das Zahnrad E befestigt ist, durchdringt frei den unteren Stein, welcher immerwährend feststehen bleibt und der Bodenstein genannt wird. Sie erhebt sich über die obere Fläche desselben und trägt an ihrem Ende den zweiten, sich drehenden Stein, den Läufer. Dieser zweite Stein hat keinen anderen Unterstützungspunkt, als das Ende dieser Welle, und da seine untere Fläche parallel mit der oberen des Bodensteins und stets genau horizontal bleiben soll, so muss er gehörig balancirt werden. Zu diesem Zweck wird auf seine obere Fläche an geeigneten Stellen Gyps aufgegossen, bis sich der Stein weder nach der einen, noch nach der andern Seite hin neigt. Um den beiden Steinen die passende Entfernung von einander geben zu können, kann der Läufer gehoben oder gesenkt werden, indem man die Pfanne, in welcher der untere Zapfen der Welle F ruht, mittelst einer Schraube hinauf- oder herabschraubt.

Das zu mahlende Getreide wird in eine Art von Trichter I gebracht, welcher auch Gosse genannt wird; an dem untern Theil dieses Trichters befindet sich eine Oeffnung, deren Grösse nach Belieben regulirt werden kann. Unmittelbar darunter ist eine Art kleiner geneigter Trog L, das Schüttelkästchen oder der Gossenschuh, so aufgehängt, dass er durch einen Daumen K, der an einer Verlängerung der Achse des Läufers angebracht ist, eine hin- und hergehende, schüttelnde Bewegung annimmt. Wenn sich der Läufer dreht, so stösst dieser Daumen K bei jeder Umdrehung an den kleinen Trog L und veranlasst dadurch das Herabfallen einer kleinen Quantität von Körnern, die in dem Troge enthalten sind. Das Getreide, welches auf diese Weise nach und nach herabfällt, fällt durch eine Oeffnung, welche in der Mitte des Läufers angebracht und nur theilweise durch das Mühleisen ausgefüllt ist, welches zur Befestigung dieses Steins an den Kopf der Welle F dient. Es gelangt auf diese Weise auf die Mitte der oberen Fläche des Bodensteins und geräth bald

in den Zwischenraum zwischen die beiden Steine hinein. Die Oeffnung in der Mitte des Bodensteins, in welcher sich die Welle F dreht, ist mit Leder und Tuch bedeckt, um zu verhindern, dass das Getreide durch sie hindurch unter diesen Stein herabfällt. Der Läufer sucht jedes Getreidekorn in seiner Rotationsbewegung mit fortzureissen, und da zwischen den beiden Steinen nur eine geringe Entfernung besteht, so wird das Korn zugleich dadurch zermalmt. Jedes daraus hervorgehende Theilchen würde, wenn es mit dem Läufer in fester Verbindung wäre, bei der Bewegung desselben den Umfang eines Kreises beschreiben; aber da jenes nicht der Fall ist, so erhält es blos von Zeit zu Zeit einen Anstoss von demselben, und in Folge dieser Anstösse verschiebt es sich nach der Tangente des Kreises, welchen der entsprechende Punkt des Läufers beschreibt. Es folgt daraus, dass sich die Mehltheilchen, welche aus der Zerkleinerung der Getreidekörner hervorgehen, während der Bewegung des Läufers immer weiter vom Centrum des Bodensteins entfernen. Die Mischung von Mehl und Kleie, Mahlgut genannt, wird auf diese Weise gegen den Umfang der beiden Steine geführt, fällt dort zwischen ihnen heraus und sammelt sich in einem ringförmigen geschlossenen Raum, welcher den Läufer umgibt. In diesem Raum angekommen, wird es aber von dem in Bewegung befindlichen Stein immer noch mit fortgerissen, und fällt endlich durch eine seitwärts angebrachte Oeffnung heraus. Von hier aus wird nun das Mahlgut in Apparate gebracht, welche die Trennung von Mehl und Kleie und die Sortirung des Mehles zu bewerkstelligen haben. Diese Apparate werden, wie diejenigen, welche zum Putzen des Getreides vor dem Mahlen dienen, gleichfalls durch das Wasserrad in Bewegung gesetzt: zu diesem Zweck verlängert sich die Welle B, indem sie den Fussboden durchdringt, und trägt an ihrem oberen Theil die Räder und Rollen, welche zur Mittheilung der Bewegung erforderlich sind.

Eine Glocke *c* ist auf solche Art angebracht, dass sie den Müller aufmerksam macht, wenn der Trichter J fast kein Getreide mehr enthält. Diese Glocke ist nämlich mittelst einer Schnur mit einem Holzpflöckchen *b* verbunden, das über ein vertikales Eisenstäbchen so gesteckt ist, dass es sich ohne die geringste Schwierigkeit längs dieses Stäbchens auf- und abschieben, sowie um dasselbe drehen lässt. Das Pflöckchen wird ausserdem durch eine andere Schnur gehalten, welche, nachdem sie sich über eine kleine Rolle gelegt hat, in den Rumpf hineinragt und sich daselbst in einem leichten Stückchen Holz endigt. Dieses Holz-

stückchen wird in das in dem Rumpfe enthaltene Getreide versenkt und bleibt darin, so lange das Getreide in hinreichender Menge vorhanden ist; während dieser ganzen Zeit wird das Pflöckchen *b* in passender Höhe gehoben erhalten. Wenn aber das Getreide in dem Rumpf zu Ende geht, so fällt das Pflöckchen *b* zurück, indem es das Stückchen Holz in dem Rumpf, welches nun von dem Getreide nicht mehr genügend zurückgehalten wird, in die Höhe hebt. Von da an stösst ein Daumen *a*, welcher an der Verlängerung der Welle des Läufers befestigt ist, und welcher sich zugleich mit diesem Stein dreht, bei jeder Umdrehung gegen das Pflöckchen *b* und macht so die Glocke läuten. Das Geräusch, welches dadurch entsteht, hört nicht eher auf, als bis der Müller, nachdem er den Rumpf wieder gefüllt hat, das Stückchen Holz in demselben in das Getreide versenkt und dadurch das Pflöckchen *b* über den Daumen *a* erhebt.

Die Säulen N, vier an der Zahl, ruhen auf zwei Steinblöcken und tragen starke Holzbalken, auf welchen die beiden Bodensteine liegen. Auf den erwähnten Steinblöcken sind auch die beiden Pfannen angebracht, in denen sich die unteren Zapfen der Wellen der Läufer drehen.

§. 188. Die Mühlsteine bestehen manchmal aus einem einzigen Stück Stein, sind dann aber gewöhnlich mangelhaft. Die besten härtesten Mühlsteine sind die sog. Champagnersteine; sie werden durch die Vereinigung von mehreren, wohl ausgewählten Stücken gebildet, welche unter sich durch Gyps verbunden und durch starke eiserne Reife zusammengehalten werden. Der Durchmesser eines Steins variirt in den älteren Mühlen von $1^m,80$ bis $2^m,30$; in den Mühlen neuerer Construction dagegen, welche gewöhnlich Kunstmühlen genannt werden, haben die Steine nur $1^m,30$ Durchmesser. Da die Champagnersteine auf ihrer Oberfläche nicht rauh genug sind, so müssen sie auf eine besondere Art behauen werden. Man bringt dabei nämlich eine Art Furchen auf denselben an, die vom Centrum nach dem Umfang gerichtet und so angeordnet sind, wie es Fig. 288 zeigt. Die Furchen sind nicht in der Richtung der Radien geführt, sondern bilden im Gegentheil einen sehr bedeutenden Winkel mit denselben; sie sind auf der Oberfläche jedes der beiden Steine, wenn man sich dieselben neben einander gelegt denkt, in demselben Sinne gerichtet. Wenn daher die beiden Steine, mit ihren Mahlflächen einander zugekehrt, über einander gelegt werden, was nur dadurch bewerkstelligt werden kann, dass man den Läufer herumwendet, so ist klar, dass die Furchen dieses

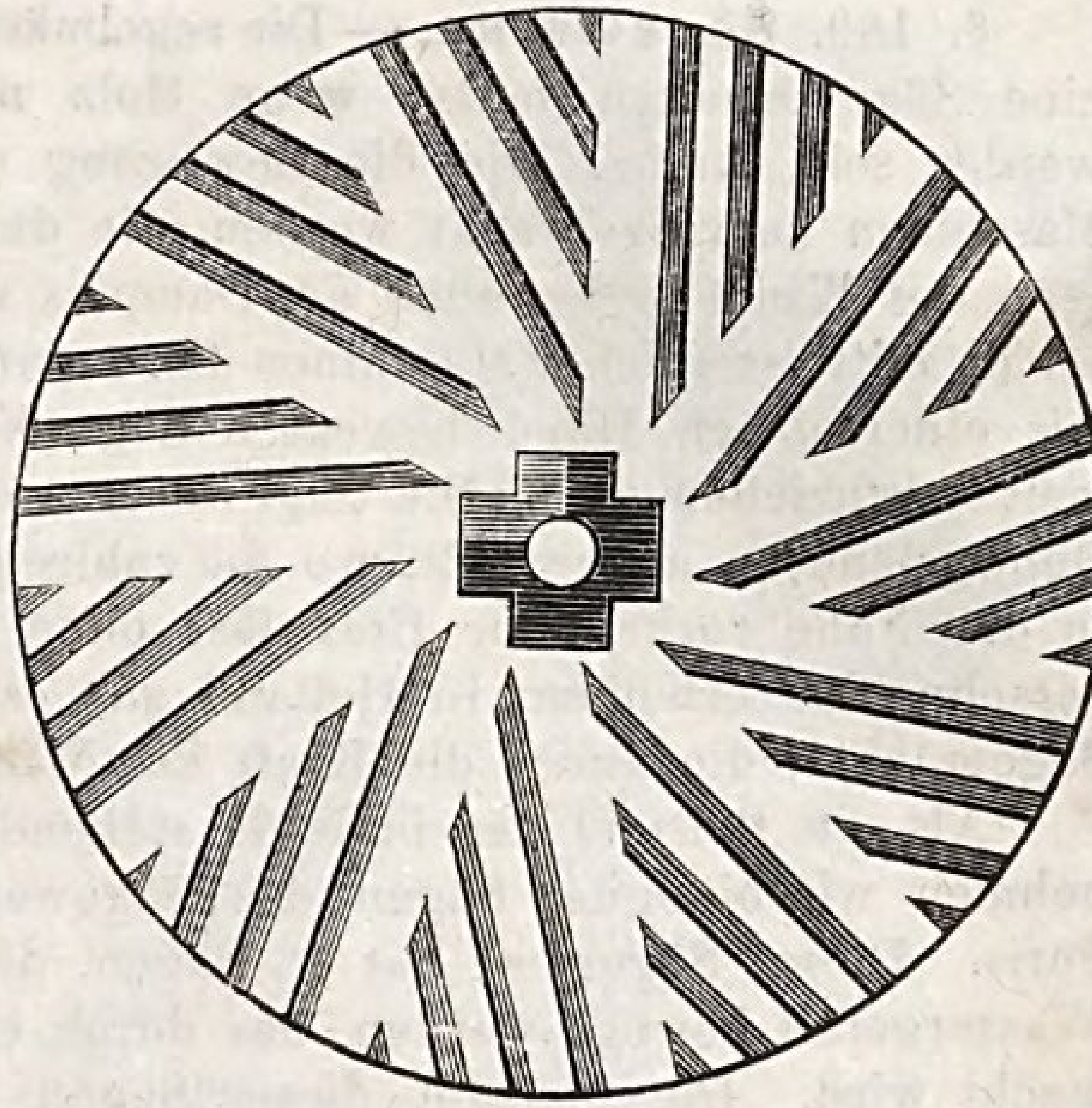


Fig. 288.

letzteren Steines Winkel mit denjenigen des Bodensteines bilden; während der Läufer sich herumdreht, wirken nun die Ränder dieser Furchen wie die beiden Theile einer Scheere gegen einander. Die Furchen haben nur eine geringe Tiefe, und diese Tiefe vermindert sich allmählich von dem einen ihrer Ränder bis zum andern, wo sie ganz Null wird. In Fig. 289 ist ein Durchschnitt der beiden über einander liegenden Steine abgebildet, um die Gestalt des Querschnittes der Furchen und die Art und Weise, wie sie auf den beiden Steinen angebracht sind, zu zeigen. Der Pfeil bezeichnet den Sinn der Bewegung des Läufers.

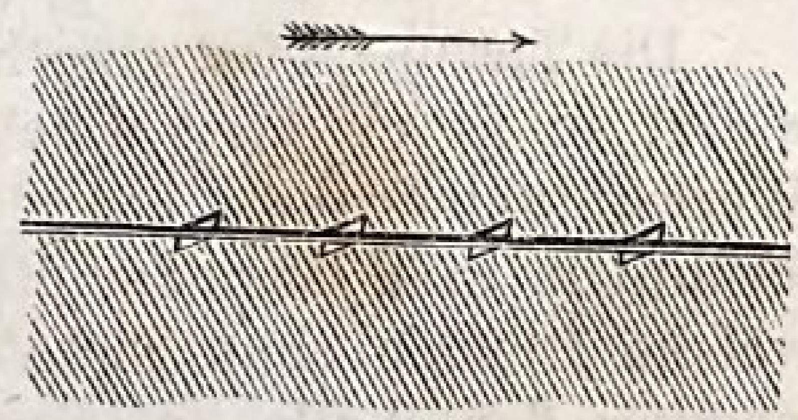


Fig. 289.

Ein Paar Steine oder ein sogenannter Mahlgang kann, je nachdem mehr oder weniger Sorten Mehl gemacht werden, 8 bis 10 Hectoliter ($3^1/_2$ bis $4^1/_2$ Schäffel bayerisch) Getreide in 24 Stunden mahlen. Die hiezu erforderliche Kraft beträgt ungefähr 4 Pferdekräfte für den Gang, die Maschinen zum Putzen, Sortiren etc. eingerechnet. Die Zahl der Umdrehungen des Läufers ist nach der Grösse der Steine verschieden; sie beträgt bei denen mit $1^m,3$ Durchmesser ungefähr 100 bis 120 in der Minute, kann aber auch bis 200 steigen, wenn die Steine kleiner sind. Man kann daraus leicht berechnen, wie viel Umdrehungen die Welle des Wasserrads in der Minute machen muss, wenn die Anzahl der Zähne der Zahnräder, welche die Bewegung von dieser Welle auf die Steine zu übertragen haben, gegeben sind, und kann dann dieses Wasserrad so construiren, dass es von der vorhandenen Wasserkraft die hieraus folgende Geschwindigkeit erhält.

§. 189. **Sägewerke.** — Die regelmässige Bewegung, welche eine Säge erhalten muss, wenn Holz mit ihr durchschnitten werden soll, kann, wie die Bewegung der Mühlsteine, durch Maschinen hervorgebracht werden, die durch die Kraft des Wassers, des Windes oder auch des Dampfes getrieben werden. Man erhält mittelst solcher Maschinen Erzeugnisse, welche denen, die mit einer durch Hand bewegten Säge hervorgebracht werden, weit vorzuziehen sind. Die Sägewerke werden am häufigsten in Gebirgsländern angewandt, wo die zahlreichen Wassergefälle das in der Nähe vorhandene Holz fast ohne Kosten zu Brettern zu verschneiden erlauben. In Holland gab es in sehr frühen Zeiten Sägemühlen, die durch die Kraft des Windes getrieben wurden.

Als ein Beispiel der in Rede stehenden Art von Maschinen nehmen wir eine der Sägen des Sägewerks von St. Maur bei Paris. Dieses Sägewerk hat 16 Sägen, die sämmtlich durch ein Wassergefäll bewegt werden, das durch eine Turbine nutzbar gemacht wird. Die meisten dieser Sägen dienen zum Schneiden von Mahagonifourniren, einige werden auch zum Schneiden von Brettern verwendet. Wir wollen eine der ersteren beschreiben.

Die Turbine setzt eine horizontale Welle, eine Transmissionswelle, in Bewegung, welche sich durch die ganze Länge der Werkstätte erstreckt. Auf dieser Welle sind in gewissen Entfernungen von einander Räder A (Fig. 290) angebracht, über welche Riemen ohne Ende gespannt sind, durch welche die Bewegung der Welle auf den Mechanismus der Säge übertragen wird. Jeder dieser Riemen umspannt zu diesem Behufe noch eine Rolle B, deren Durchmesser bedeutend kleiner als derjenige des Rades A ist; sie erhält daher eine sehr rasche Rotationsbewegung, vorausgesetzt, dass der Riemen eine genügende Spannung besitzt, sodass er nicht über ihre Oberfläche weggleiten kann. Diese Spannung des Riemens wird durch das Stück Holz CD hervorgebracht, welches sich an dem einen Ende frei um den Bolzen D drehen kann, während es sich mit dem andern mittelst einer Frictionsrolle C gegen den Riemen anlegt. Um den Mechanismus, welcher mit der Rolle B in Verbindung steht, zum Stillstand zu bringen, darf man nur das Holzstück CD erheben; dadurch verliert der Riemen seine Spannung und gleitet über die Oberfläche der Rolle B, ohne dieselbe mitzunehmen.

Am Ende der Achse der Riemenrolle B ist ein Schwungrad E befestigt; der eine Arm dieses Schwungrads trägt einen Bolzen F, um welchen das Ende einer Lenkstange FG beweglich ist; diese Lenkstange, die in G mit dem Rahmen oder Gatter der

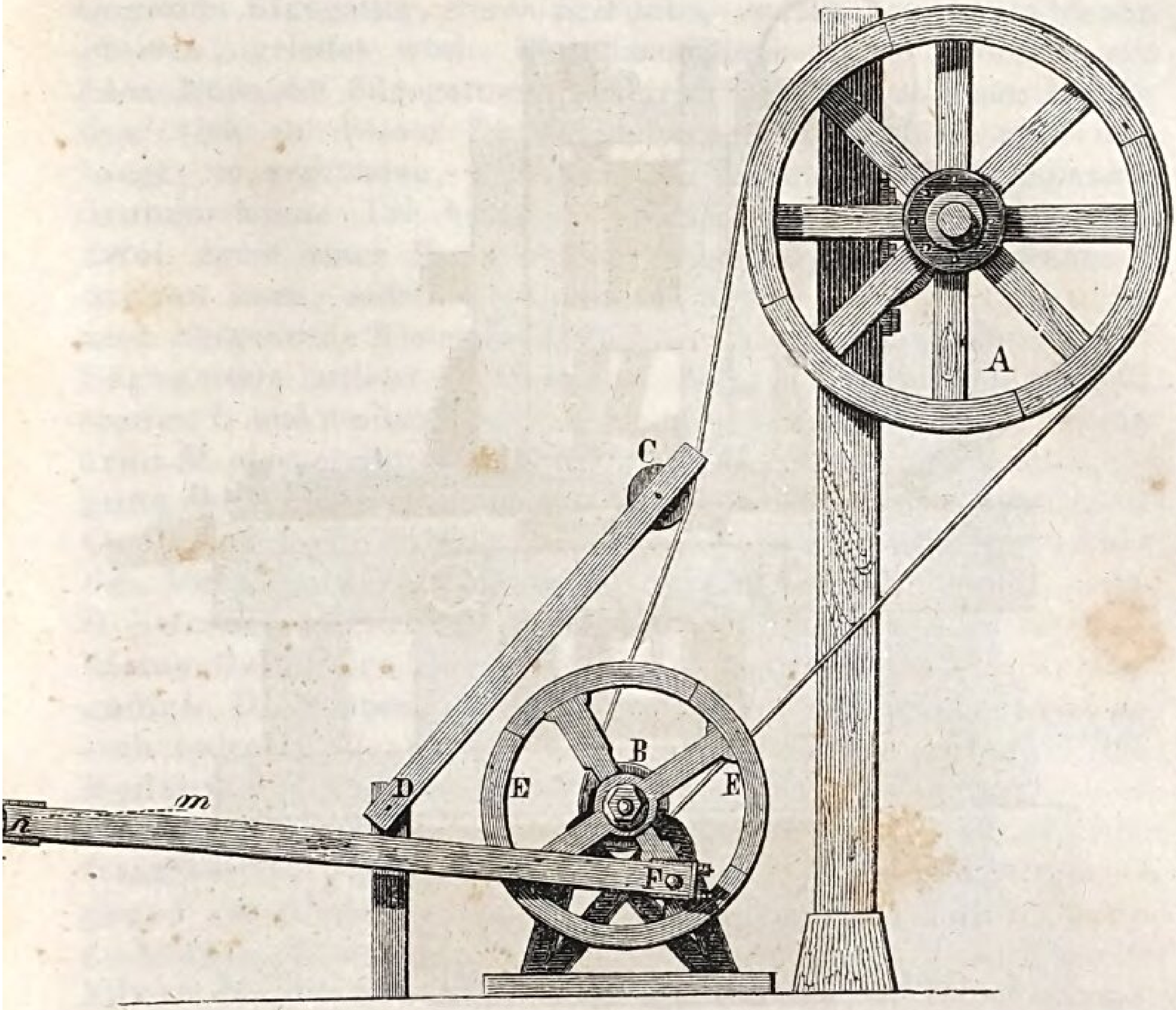


Fig. 290.

Säge mittelst eines Gelenkes in Verbindung steht, wird durch das Schwungrad, wie durch eine Kurbel, in Bewegung gesetzt; ihr Ende G nimmt eine, längs der horizontalen Linie mn hin- und hergehende Bewegung an.

Das Sägegatter, welches horizontal liegt, hat wie gewöhnlich die Form eines Rechtecks, durch dessen Mitte der Länge nach der Holzstab HH (Fig. 291) geht. Eine Seite dieses Rechtecks, diejenige, welche in der Figur hinter dem Stab HH liegt, wird durch das Sägeblatt II gebildet, dessen Fläche vertikal steht, sodass seine Zähne nach unten gekehrt sind. Die andere Langseite des Rechtecks wird von einem Eisenstab eingenommen, der sich vor dem Stab HH befindet, und dessen Enden mit Schraubengewinden und Muttern versehen sind, die den Zweck haben, dem Sägeblatt eine starke Spannung geben zu können. Gegen die vordere Fläche des Sägeblattes legt sich ein Eisenstück K, das an seiner unteren Kante schräg zuläuft und dazu gehört, das

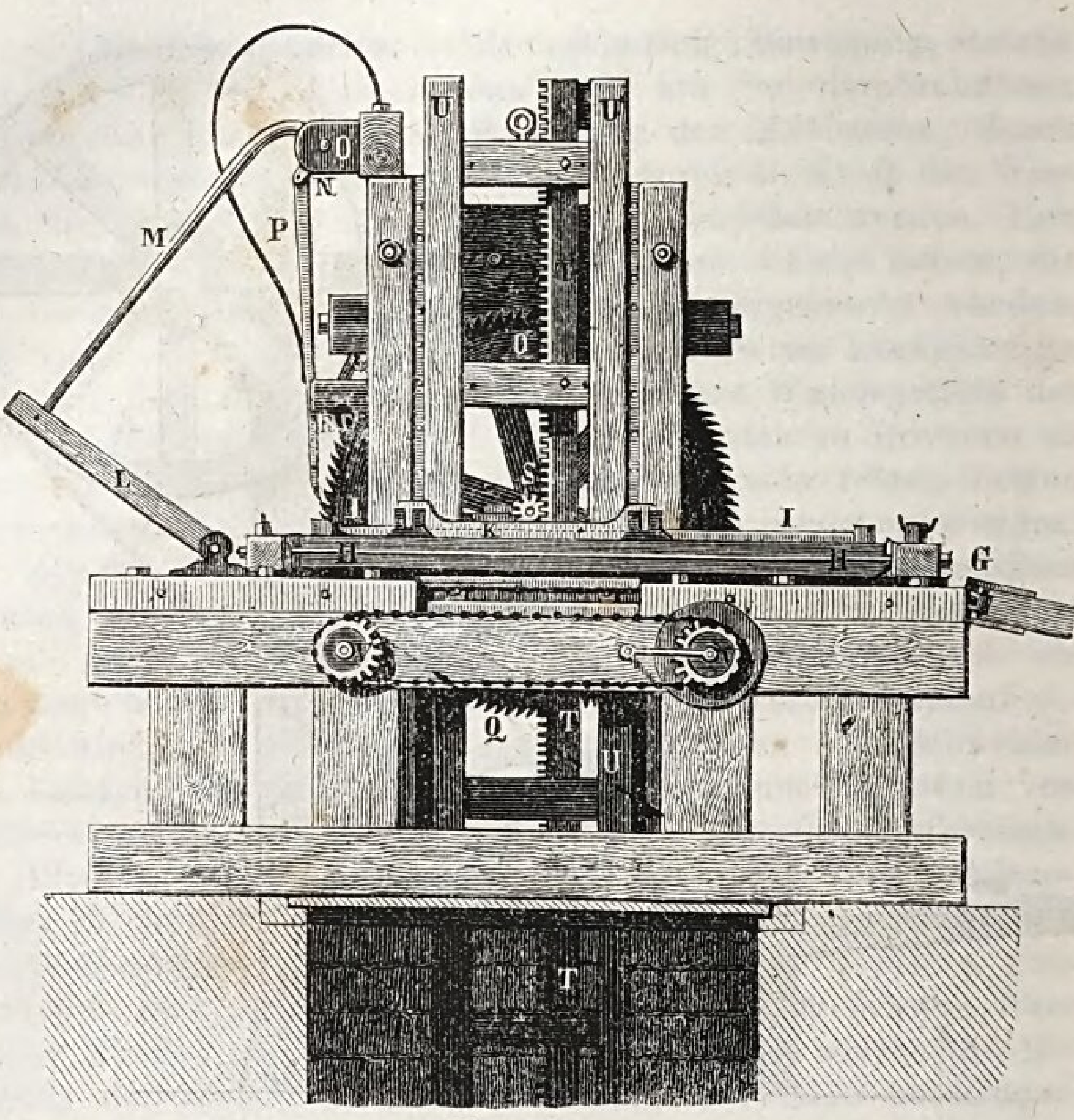


Fig. 291.

Sägeblatt während seiner schnellen Hin- und Herbewegung, die ihm von der Lenkstange G mitgetheilt wird, immer genau in derselben Ebene zu erhalten. Die Bewegung des Gatters wird ausserdem durch Schlitten von Eisen geleitet, welche in Schleifschienen, die auf dem Gestell der Maschine befestigt sind, gleiten.

In Folge der Art und Weise, wie die Säge angebracht ist, kann sie sich weder heben noch senken; sie bleibt bei ihrer hin- und hergehenden Bewegung immer genau in derselben Höhe. Es ist also nothwendig, dass das Stück Holz, das zerschnitten werden soll, seinen Platz verändert und sich selbst den Zähnen der Säge darbietet. Aus diesem Grunde ist folgende Anordnung getroffen. Das Stück Mahagoni X (Fig. 292) ist mit gutem Leim auf einem Rahmen YY befestigt; dieser Rahmen ist wieder mittelst Schraubenbolzen und Muttern mit einem zweiten Rahmen UU (Fig. 291) verbunden, der sich vertikal auf- und abbewegen kann und bei dieser Bewegung, ähnlich wie das horizontal

liegende Sägegatter, durch Schlitten, welche in Schleifschienen gleiten, geleitet wird. Eine Lenkstange L ist einerseits mit dem Ende des Sägegatters, andererseits mit dem Eisenstabe M, der sich zu diesem Zweck an seinem Ende horizontal umbiegt, so verbunden, dass sie sich um die Verbindungspunkte drehen kann. Die beiden Eisenstücke M und N bilden die zwei Arme eines Kniehebels, welcher sich um den Punkt O drehen kann, sodass die hin- und hergehende Bewegung des Sägegatters mittelst der Lenkstange L und des langen Hebelarms M eine oscillirende Bewegung des Armes N um den Punkt O hervorbringt. An dem Ende des Hebelarmes N ist ein Stab P befestigt, welcher sich in eine kleine Gabel, eine Sperrklinke, endigt. Diese Sperrklinke legt sich zwischen die Zähne eines Rades Q und wird darin durch eine grosse gekrümmte Feder festgehalten, welche sie stets gegen den Umfang des Rades andrückt. Eine andere Sperrklinke R, die sich um einen

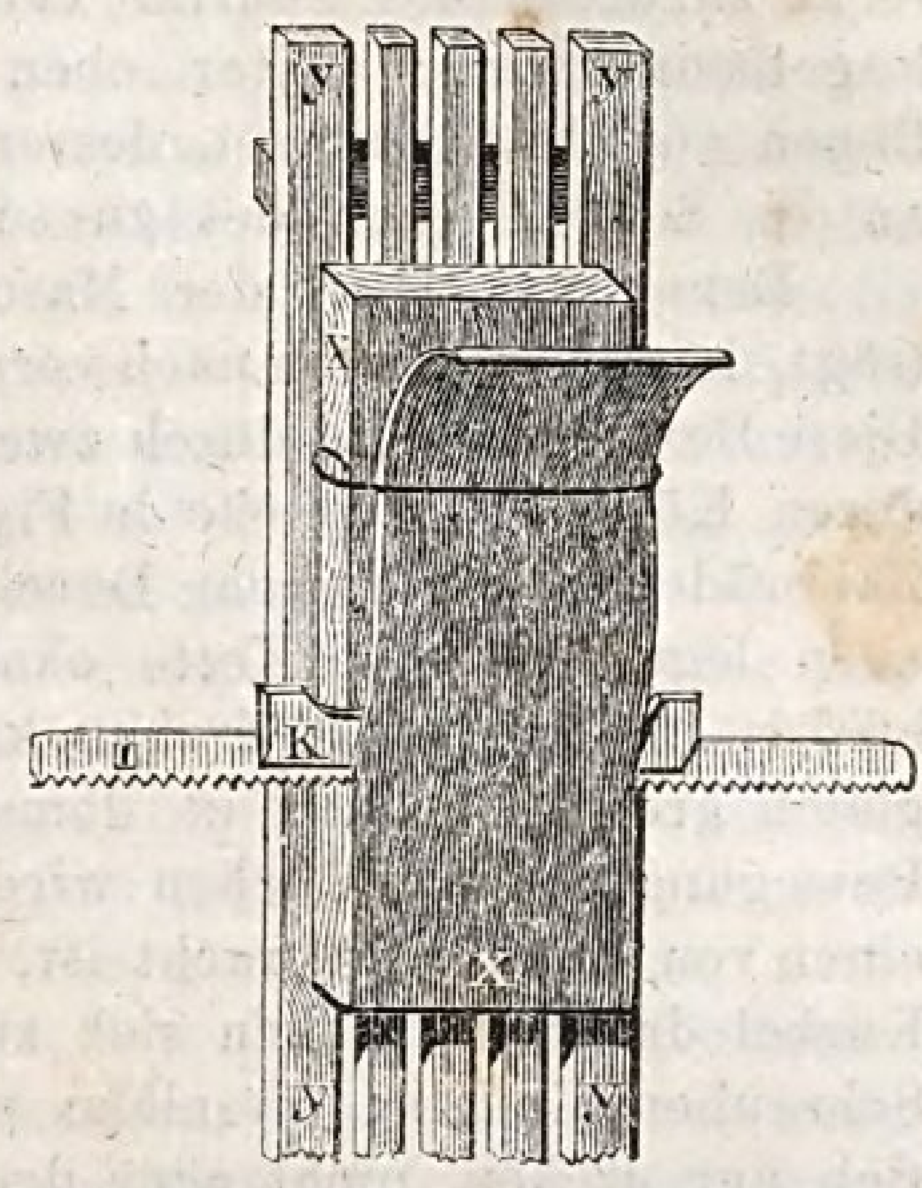


Fig. 292.

festen Punkt drehen kann, legt sich ebenso zwischen die Zähne des Rades Q und wird gleichfalls durch eine kleine Spiralfeder in ihrer Lage festzuhalten gesucht. In Folge der oscillirenden Bewegung des Hebelarmes N hebt und senkt sich die Sperrklinke P: wenn sie sich erhebt, so gleitet sie über die Zähne des Rades Q hinweg, aber wenn sie sich senkt, so ergreift sie einen von diesen Zähnen und dreht dadurch das Rad Q ein Stückchen herum. Die Sperrklinke R hat nur den Zweck, die Bewegung des Rades Q im entgegengesetzten Sinne zu verhindern, wenn sich die Sperrklinke P hebt. Die Achse des Rades Q trägt ein Trieb S, welches in eine Zahnstange T eingreift, die mit dem Rahmen UU in fester Verbindung steht. Man sieht also, dass während des Hin- und Hergehens der Säge das Stück Mahagoni, welches sie zerschneiden soll, und welches mit dem Rahmen UU in fester Verbindung steht, in langsamer, absetzender Bewegung emporsteigt. Die Säge kann also in das Holz immer tiefer eindringen und es zerschneiden.

Die für Fournire zu verwendenden Mahagoniblätter erhalten nur eine sehr geringe Dicke, sodass sie sich, wenn sie nur in einigermaassen grosser Länge durch die Säge vom Mahagoniblock losgetrennt sind, nicht mehr von selbst aufrecht erhalten können. Die Fig. 292 zeigt, in welcher Weise sie vor zu starkem Herabbiegen geschützt werden. Das abgeschrägte Eisenstück K, welches an der vordern Seite des Sägeblattes angebracht ist, entfernt zunächst das Fournir etwas von dem Block, von dem es losgetrennt wird; weiter oben aber wird dasselbe von einem Bogen von Drath umfasst, dessen umgebogene Enden sich federnd an die Seitenflächen des zu schneidenden Holzblockes anlegen.

Der ganze Theil der Maschine, welcher den Rahmen UU trägt, kann von hinten nach vorn und umgekehrt bewegt werden. Diese Bewegung wird durch zwei lange Schrauben hervorgebracht, deren Köpfe V V, welche in Figur 291 sichtbar sind, zwei kleine Zahnräder von gleichem Durchmesser tragen. Um diese Rädchen legt sich eine Kette ohne Ende so, dass keines von den beiden Rädchen sich drehen kann, ohne dass dem andern eine gleich grosse Drehung in demselben Sinne ertheilt wird. Die Bewegung dieser Rädchen wird durch eine Kurbel, die an dem einen von ihnen angebracht ist, hervorgebracht. Wenn man diese Kurbel dreht, so drehen sich zugleich die beiden oben erwähnten Schraubenspindeln; dieselben sind aber so angebracht, dass sie sich nur drehen, nicht aber der Länge nach verschieben können, während sich die Muttern, in welchen sie sich drehen, nur längs der Achse verschieben, nicht aber drehen können. Diese Muttern sind also genöthigt, nach vorn oder hinten zu rücken, je nachdem jene Kurbel in dem einen oder entgegengesetzten Sinne gedreht wird, und theilen diese ihre Bewegung dem Rahmen UU mit, an dem sie befestigt sind. Es ist klar, dass man mit Hilfe dieses Mechanismus beim Beginne eines jeden neuen Sägeschnittes den Rahmen UU und mit ihm den Holzblock, welcher auf ihm befestigt ist, um eine bestimmte beliebig kleine Grösse nach vorn rücken kann, und dass es daher möglich ist, Blätter von beliebig kleiner und immer gleicher Dicke zu erhalten.

Das Rad A (Fig. 290) macht etwa 55 Umdrehungen in der Minute; da sein Durchmesser ungefähr fünfmal so gross als derjenige der Rolle B ist, so dreht sich diese nahe 275mal in der Minute herum, und dies ist offenbar zugleich die Zahl der Sägeschnitte, die in derselben Zeit gemacht werden. Bei jedem solchen Sägeschnitt steigt der Mahagoniblock um ungefähr einen halben Millimeter. Mit einer Säge der beschriebenen Art können sechs

Quadratmeter Fournire des Tags geschnitten werden. Die Grösse, um welche das Mahagonistück mittelst der Schrauben VV jedesmal, wenn ein neues Blatt genommen werden soll, vorgerückt wird, beträgt $1^{mm},2$, und weil der Abfall von Sägespänen 50 Procent ausmacht, so folgt daraus, dass jedes Mahagoniblatt nicht viel mehr als einen halben Millimeter dick ist.

§. **190.** Die Sägen, welche zum Schneiden von Brettern angewendet werden, stehen vertikal und bewegen sich weniger schnell, als die Fournirsägen. Sie machen nur 100 bis 140 Schnitte in der Minute. Die Grösse, um welche das zu schneidende Stück Holz bei jedem Schnitt fortrückt, beträgt, je nach der Härte des Holzes, 2 bis 5 Millimeter. In neuerer Zeit construirt man solche Sägen mit mehreren parallel stehenden Sägeblättern, deren Entfernung von einander gleich der Dicke der zu schneidenden Bretter ist (Bundgatter). Auf diese Weise gelingt es, ganze Stämme auf einen Schnitt in Bretter zu zertheilen.

Man wendet häufig auch Circularsägen an, eine Art Räder von dünnerem oder stärkerem Blech, die an ihrem Umfange mit Sägezähnen versehen sind. Dieselben brauchen sich während ihrer Thätigkeit blos immer um ihre Achse und stets in demselben Sinn zu drehen, während die geradlinigen Sägen nothwendig eine hin- und hergehende Bewegung erhalten müssen. Jene Achse ist horizontal unter einem Tisch gelagert, über welchen durch einen Schlitz hindurch das kreisförmige, in einer vertikalen Ebene rotirende Sägblatt nicht ganz bis zur Hälfte heraufragt. Das zu schneidende Stück Holz wird der Säge auf diesem Tisch längs eines, es geradführenden Anschlags zugeführt. Die Circularsägen werden nicht blos zum Sägen des Holzes, sondern auch der Metalle angewendet. Um z. B. die Enden der Eisenbahnschienen abzugleichen und diesen Schienen immer die gleiche Länge zu geben, schneidet man die zuvor glühend gemachten Enden derselben mittelst Circularsägen ab, die aus gutgeschmiedetem Eisenblech bestehen. Der Durchmesser derselben beträgt gewöhnlich einen Meter, ihre Dicke $2^{mm},75$; sie machen 850 Umdrehungen in der Minute. Damit sich die Säge nicht zu sehr erhitzt, lässt man ihren unteren Theil in ein Gefäss tauchen, das mit Wasser gefüllt ist.

Bei den sog. Bandsägen ist ein schmales und dünnes Sägeblatt mit seinen Enden zusammengelöthet und über 2 vertikal übereinander liegende Rollen gespannt, sodass ein Sägeblatt ohne Ende entsteht. Diese Rollen werden in rasche Rotation gesetzt, und mit ihnen das Sägeblatt. Der abwärts gehende Theil desselben

geht durch einen Schlitz des Sägetisches hindurch, auf welchem ihm das zu schneidende Stück Holz entgegengeführt wird. Auf diese Weise ist es möglich, krummlinige oder geschweifte Sägschnitte zu führen.

§. 191. **Hammerwerke.** — Die schweren Hämmer, welche in den Eisenwerken zur Bearbeitung der grossen Stücke Eisen dienen, werden durch Wasserräder oder Dampfmaschinen in Bewegung gesetzt. Wir wählen als ein Beispiel eines solchen Hammers den in Fig. 293 dargestellten, welcher lange Zeit hindurch in den Werkstätten von Cavé in Paris in Thätigkeit war.

Der Kopf des Hammers, A, ist von Gusseisen und wiegt mehr als 1700 Kilogramm. Durch die weite Oeffnung, welche er hat, ist der Stiel oder Helm hindurchgesteckt und mittelst eines Keiles darin befestigt. Dieser Helm trägt ungefähr in der Mitte seiner Länge zwei, zu beiden Seiten angebrachte Zapfen, welche von zwei Lagern getragen werden, die in C an zwei starken vertikalen Pfosten befestigt sind, zwischen welchen der Helm des Hammers hindurchgeht. Zwei Daumen D, D, welche an einer horizontalen Welle sitzen, stossen bei der Umdrehung dieser Welle nacheinander gegen das hintere Ende, den Schwanz, des Helms B. Bei jedem solchen Anstoss wird der Hammer gehoben, um gleich darauf wieder zurückzufallen und von dem folgenden Daumen wieder gehoben zu werden u. s. w. Die Welle, welche die Daumen D, D trägt, erhält ihre Rotationsbewegung von einer Dampfmaschine, welche auf die Kurbel E wirkt. An dieser Welle sind ausserdem zwei ganz gleiche Schwungräder F zu beiden Seiten der Daumen D, D befestigt. Die Figur zeigt nur eines von diesen beiden Rädern, das vordere; das hintere wird von diesem verdeckt.

Ein langer Hebel GH, welcher horizontal um die kleine vertikale Achse K gedreht werden kann, ist in G an einer starken Eisenstange befestigt, mit welcher man die Thätigkeit des Hammers nach Belieben unterbrechen kann. Zu diesem Zweck zieht man in einem passenden Augenblick, während der Hammer seine höchste Lage einnimmt, das Ende H des Hebels schnell nach vorn. Dadurch geht die an dem andern Ende G dieses Hebels befestigte Eisenstange nach rückwärts und kommt unter den Helm des Hammers zu stehen, sodass sie den letzteren verhindert, auf den Amboss L zurückzufallen. Wenn die Daumen D, D fortfahren, auf den Schwanz des Hammers zu wirken, so erhebt sich der Hammer wohl ein wenig, aber er fällt hierauf immer nur eine kleine Grösse herab und bleibt auf diese Weise

in genügender Entfernung über dem Amboss gehalten, damit man die zu schmiedenden Eisenstücke, welche auf diesem liegen, bequem hin- und herwenden oder auch wegnehmen kann.

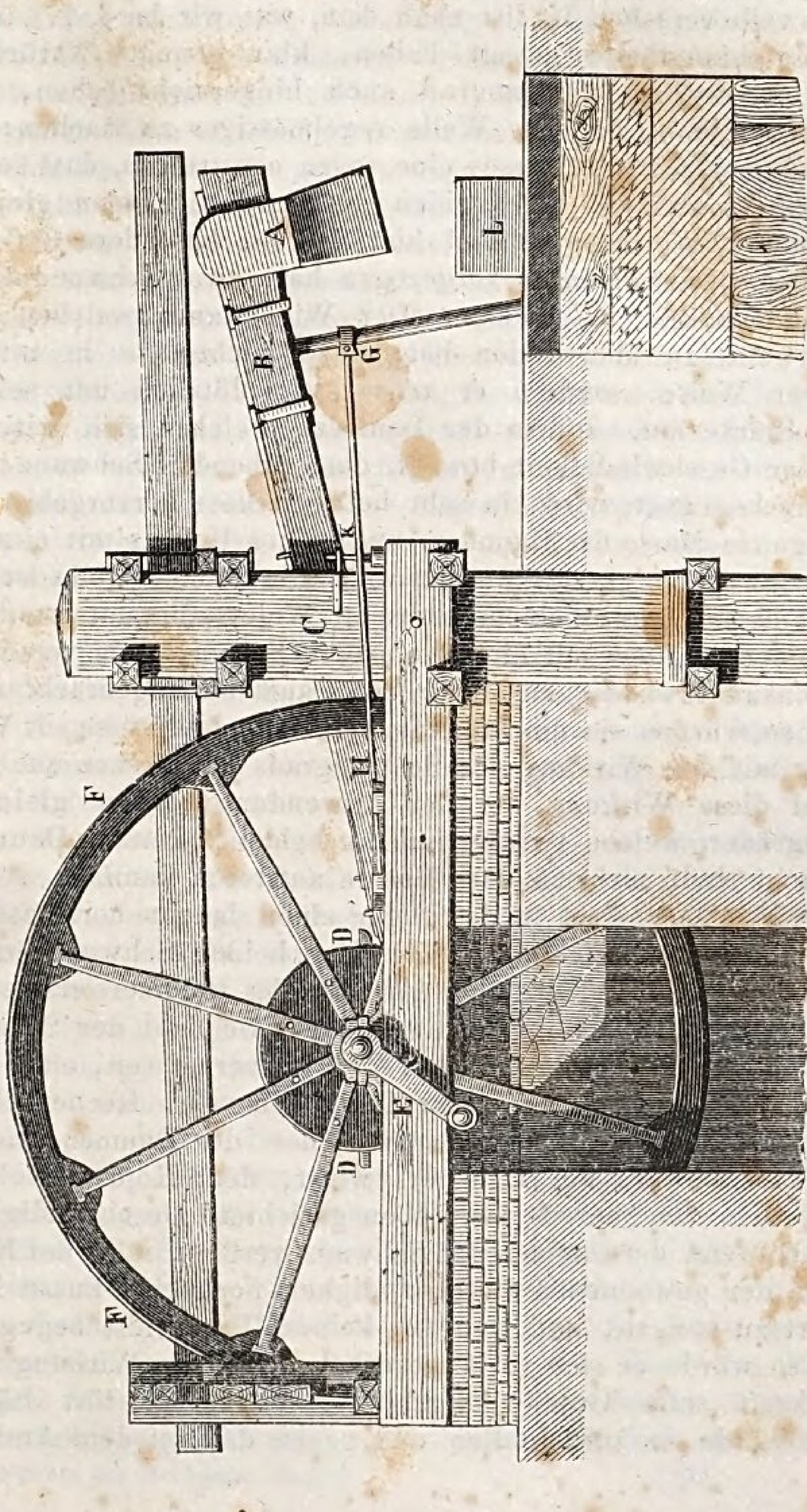


Fig. 293. (Maassstab 12 : 1000.)

Bei der entgegengesetzten Bewegung des Hebels GH kommt der Hammer natürlich wieder in Thätigkeit.

§. **192.** Der Zweck der Schwungräder, mit welchen die Daumenwelle versehen ist, ist nach dem, was wir im §. 173 über diese Maschinentheile gesagt haben, klar genug. Natürlich würde ein einziges Schwungrad auch hingereicht haben, um die Rotationsbewegung der Welle regelmässiger zu machen; es wäre ja leicht gewesen, dieses eine so zu construiren, dass seine Wirksamkeit der von den beiden zusammenwirkenden gleichgekommen wäre. Aber es sind hier andere, besondere Gründe vorhanden, warum man es vorgezogen hat, zwei Schwungräder statt ein einziges zu nehmen. Der Widerstand, welchen die Daumenwelle zu überwinden hat, wirkt nicht blos in unterbrochener Weise, sondern er tritt auch plötzlich mit seiner ganzen Stärke auf. Indem der Daumen, welcher sich mit bedeutender Geschwindigkeit bewegt, dem ruhenden Schwanz des Hammers begegnet, wird ein sehr heftiger Stoss hervorgebracht, da die ganze Masse des Hammers und seines Helmes mit einemmal in Bewegung gesetzt werden soll. Die Daumenwelle ist im Moment dieses Stosses einem enormen Widerstand unterworfen. Wenn sie daher nur mit einem einzigen Schwungrade versehen wäre, das nothwendig zur Seite des Daumens angebracht sein müsste, so würden sie die auf einander folgenden Stösse, in Verbindung mit der Wirkung des Schwungrads abzudrehen suchen, während diese Wirkung bei der Anwendung zweier gleicher Schwungräder, welche symmetrisch zu beiden Seiten der Daumen angebracht sind, nicht in dem Maasse auftreten kann.

§. **193.** Man sieht in der Figur einen langen horizontalen Balken von Holz, welcher zwischen den beiden Schwungrädern hindurch geht und sich bis über den Kopf des Hammers erstreckt. Dieser sog. Prellbalken ist dazu bestimmt, die Zahl der Schläge des Hammers in einer bestimmten Zeit zu vermehren, ohne zugleich ihre Intensität zu vermindern. Um sich Rechenschaft hievon zu geben, muss man beachten, dass der Daumen, indem er auf den Schwanz des Hammers wirkt, dem Kopf desselben eine gewisse von unten nach oben gerichtete Geschwindigkeit mittheilt; wenn der Daumen den Schwanz verlässt, fährt der Kopf in Folge der gewonnenen Geschwindigkeit noch eine kurze Zeit lang fort zu steigen, und wenn er keinem Hinderniss begegnen würde, so würde er sich so lange erheben, bis die Wirkung der Schwerkraft seine Geschwindigkeit vollständig zerstört hätte. Hierauf würde er zurückfallen und gegen das auf dem Amboss

liegende Stück Eisen mit einer Geschwindigkeit stossen, welche seiner Fallhöhe entspricht (§. 115). Damit folglich die Schläge mit gehöriger Stärke vor sich gehen, ist es, im Fall der Vorgang der oben beschriebene ist, nothwendig, dass die Zeit, welche zwischen zwei Schlägen des Hammers verfliesst, gross genug ist, damit sich der Hammer bis zu einer, dieser Geschwindigkeit entsprechenden Höhe erheben und alsdann von dieser Höhe wieder zurückfallen kann. Je grösser also die Geschwindigkeit des Hammers im Moment des Stosses sein sollte, desto weniger Schläge könnte er in derselben Zeit machen. Wenn dagegen der Hammerkopf, während er emporsteigt, einem elastischen Hinderniss begegnet, welches ihn nicht nur verhindert, sich noch mehr zu erheben, sondern welches ihn auch noch mit einer Geschwindigkeit wieder zurückwirft, welche, von oben nach unten gerichtet, gleich derjenigen ist, mit welcher er diesem Hinderniss begegnete, so wird er offenbar früher zurückfallen und die Schläge werden rascher auf einander folgen, ohne an Stärke zu verlieren. Dies ist der Zweck, warum der Prellbalken angewendet wird. Derselbe besitzt eine hinreichende Elasticität, damit der Vorgang nahezu so stattfindet, wie wir ihn eben beschrieben haben. Zwar vermindert der Stoss des Hammerkopfes gegen den Prellbalken wegen der nicht ganz vollkommenen Elasticität beider die Stärke der Hammerschläge ein wenig; aber diese geringe Verminderung ist von einer sehr bedeutenden Vermehrung der Schnelligkeit der Arbeit begleitet.

Man muss indessen nicht glauben, dass das soeben angegebene Mittel, die Zahl der Hammerschläge in einer gewissen Zeit zu vermehren, ohne die Stärke derselben wesentlich zu schwächen, die Leistung der Maschine vermehre, d. h. bewirke, dass eine grössere Menge von Nutzarbeit mit demselben Aufwande von Bewegungsarbeit geleistet werde. Wenn der Hammer mehr Schläge in einer Stunde macht, so muss die Dampfmaschine offenbar mehr Bewegungsarbeit liefern. Im Allgemeinen ist die Grösse der durch die Maschine geleisteten Arbeit der Zahl der Schläge des Hammers proportional, gleichviel in welcher Zeit dieselben gemacht werden. Die Anwendung des Prellbalkens, welcher die Erhebung des Hammers begrenzt, hat also, unter diesem Gesichtspunkt betrachtet, durchaus keine Vermehrung der Leistung der Maschine zur Folge; ja genau genommen vermindert sie dieselbe sogar, weil der Stoss des Hammers gegen den Balken immer eine kleine Schwächung in der Stärke der Schläge nach sich zieht, sodass folglich mit derselben

Quantität von Bewegungsarbeit eine kleinere Menge von Nutzarbeit geliefert wird.

§. 194. Wir haben oben gesagt, dass man so viel als möglich vermeiden müsse, dass Stösse zwischen den verschiedenen Theilen einer in Gang befindlichen Maschine hervorgebracht werden. Die Maschine, mit der wir uns gegenwärtig beschäftigen, ist weit davon entfernt, diese Bedingung zu befriedigen, doch spielen die Stösse, welche während ihrer Thätigkeit stattfinden, aus dem Gesichtspunkt des Arbeitsverlustes betrachtet, nicht alle die nämliche Rolle. Was zunächst die Stösse des Hammers gegen das zu schmiedende Stück Eisen betrifft, so haben sie keinen Verlust an Arbeit zur Folge, da ja in ihnen selbst die Arbeit besteht, welche die Maschine leisten soll; man kann sie also nicht vermeiden wollen. Der Arbeitsverlust, welcher durch den Stoss zwischen nichtelastischen Körpern veranlasst wird, entspringt grösstentheils aus der bleibenden Gestaltsveränderung, welche diese Körper durch die Wirkung des Stosses erfahren; aber gerade diese Gestaltsveränderung ist es ja, welche man hier erhalten will und wozu man den Hammer anwendet. Ein geringer Arbeitsverlust findet freilich immerhin noch statt: wir haben bisher vorausgesetzt, dass der Amboss völlig unbeweglich sei; da dies aber niemals zu erreichen ist, so muss man dafür sorgen, dass er wenigstens auf einer möglichst elastischen Unterlage steht. Eine solche erhält man, wenn man Holzstücke so übereinander schichtet, dass in einer Lage die Fasern vertikal, in der andern horizontal gerichtet sind. Die Elasticität dieses Trägers erlaubt dem Amboss im Moment des Stosses etwas nachzugeben; er kehrt aber alsbald in die Lage wieder zurück, welche er vor dem Stosse einnahm.

Was zweitens den Stoss des Hammerkopfes gegen den Prellbalken betrifft, so kann daraus nur ein geringer Arbeitsverlust entstehen, da dieser Prellbalken so angebracht ist, dass er einen grossen Grad von Biegsamkeit und Elasticität besitzt.

Es bleibt also nur noch der Stoss des Daumens gegen den Schwanz des Hammers, welcher in der That durch die Erschütterungen, welche er in der Maschine veranlasst, und durch die Arbeitsverluste, welche er nach sich zieht, nachtheilig wirkt.

Die Hämmer von der Art, wie wir hier einen beschrieben haben, wo der Daumen auf den Schwanz des Hammers wirkt, heissen gewöhnlich Schwanzhämmer. Es gibt auch solche, wo der Daumen zwischen dem Drehungspunkt des Helms und

dem Hammerkopf wirkt, um letzteren zu heben; solche Hämmer heisst man Aufwerfhämmer. Endlich greift der Daumen auch nicht selten vorne, vor dem Kopf, an einer kleinen Verlängerung des Helmes an, wodurch man einen sog. Stirnhammer erhält. Endlich gibt es noch solche Hämmer, die blos aus einem schweren Stück Eisen bestehen, das zwischen zwei vertikalen Pfosten, die es führen, mittelst eines Daumens oder einer andern Vorrichtung gehoben und dann fallen gelassen wird. Sie prallen dabei aber gleichfalls gegen ein elastisches Hinderniss, wodurch die Schnelligkeit, mit welcher die Schläge auf einander folgen, vergrössert wird. Solche Hämmer heisst man gewöhnlich Quetschhämmer. Bei den Dampfhämmern endlich ist der Hammerkopf gleichfalls ein schweres Stück Eisen, das zwischen zwei Führungen vertikal gehoben und wieder fallen gelassen wird. Die Hebung geschieht hier aber direkt durch den Dampf, indem jenes Stück unten an der Kolbenstange einer vertikal stehenden Dampfmaschine befestigt ist. Manchmal steht dabei aber auch der Dampfkolben fest und wird der Cylinder sammt dem nun an ihm befestigten Hammer gehoben.

§. 195. **Stampf- oder Pochwerke.** — Mit dem Namen Stampf- oder Pochwerk bezeichnet man eine Vorrichtung, welche im Wesentlichen aus mehreren vertikal stehenden und in dieser Richtung beweglichen Pfählen, Pochstempeln genannt, besteht; diese Stempel werden gehoben und wieder fallen gelassen, wodurch eine Zerkleinerung und Pulverisirung der Körper, welche ihrer Wirkung unterworfen sind, hervorgebracht wird. Die Pochwerke werden am häufigsten beim Bergwerksbetrieb angewandt, um die Erze, welche noch mit solchen Theilen, die kein Metall enthalten, dem sog. Ganggestein, vermengt sind, klein zu pochen, wodurch eine leichtere Trennung derselben von diesem Gestein ermöglicht wird. Die Fig. 294 und 295 zeigen ein Pochwerk, welches dazu dient, die Bleierze des Bergwerks von Huelgoath in der Bretagne zu zerkleinern.

Ein fliessendes Wasser wird mittelst eines Kanals von Holz über ein oberschlächtiges Wasserrad (Zellenrad) geführt; dieses Rad dreht sich und mit ihm die Welle, auf welcher es befestigt ist. Diese Welle verlängert sich nach der einen Seite des Rades hin und geht hier vor den Pochstempeln vorbei, welche nebeneinander in einer zur Achse der Welle parallelen Reihe aufgestellt sind. Vor jedem dieser Stempel ist auf der Welle ein Ring befestigt, welcher vier Daumen A, A (Fig. 294) von Eisen trägt. Wenn sich die Welle dreht, so hebt nach und nach jeder dieser

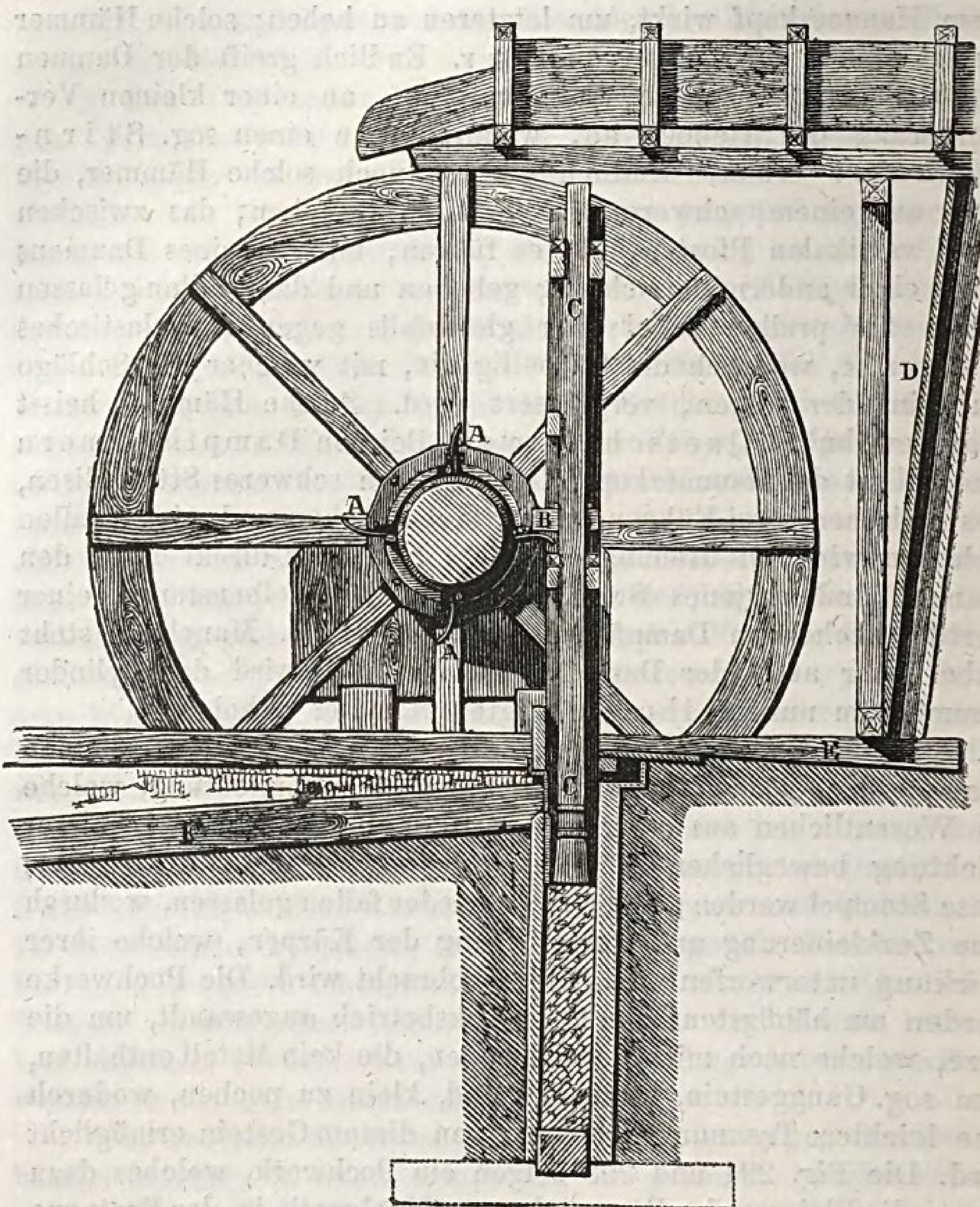


Fig. 294.

Daumen die Heblatte B, welche an dem Pochstempel C befestigt ist, in die Höhe, um sie hierauf wieder zu verlassen und den gehobenen Stempel herabfallen zu lassen. Während die Welle eine Umdrehung macht, hebt sich jeder Stempel viermal und fällt wieder zurück; er wird in dieser Bewegung durch Führungen geleitet, durch welche sein oberer Theil frei hindurchgeht.

Wenn die Daumen auf der Welle in der Weise angebracht wären, dass sie die verschiedenen Stempel alle zu gleicher Zeit aufheben und wieder fallen lassen würden, so würden die Wider-

stände, welche die Welle zu überwinden hat, sehr ungleich vertheilt sein; während des Emporhebens der Stempel würden dieselben eine sehr bedeutende Grösse haben und dagegen plötzlich fast Null werden, wenn die Daumen sämmtlich die Heblatten verliessen, und die Stempel niederfielen. Die Drehbewegung der Welle würde sich also in sehr merkbarer Weise abwechselnd beschleunigen und verzögern, was für den Gang des Wasserrads sehr nachtheilig wirken müsste. Um die Bewegung gleichförmiger zu machen, könnte man an der Daumwelle ein Schwungrad anbringen, wie es bei dem soeben beschriebenen *Cavé*'schen Hammer geschehen ist. Aber man hat hier nicht nöthig, dieses Mittel zu ergreifen; die Bewegung wird genügend regulirt, wenn man den Daumen eine andere Anordnung gibt, als wir eben vorausgesetzt haben; diese Anordnung ist folgende:

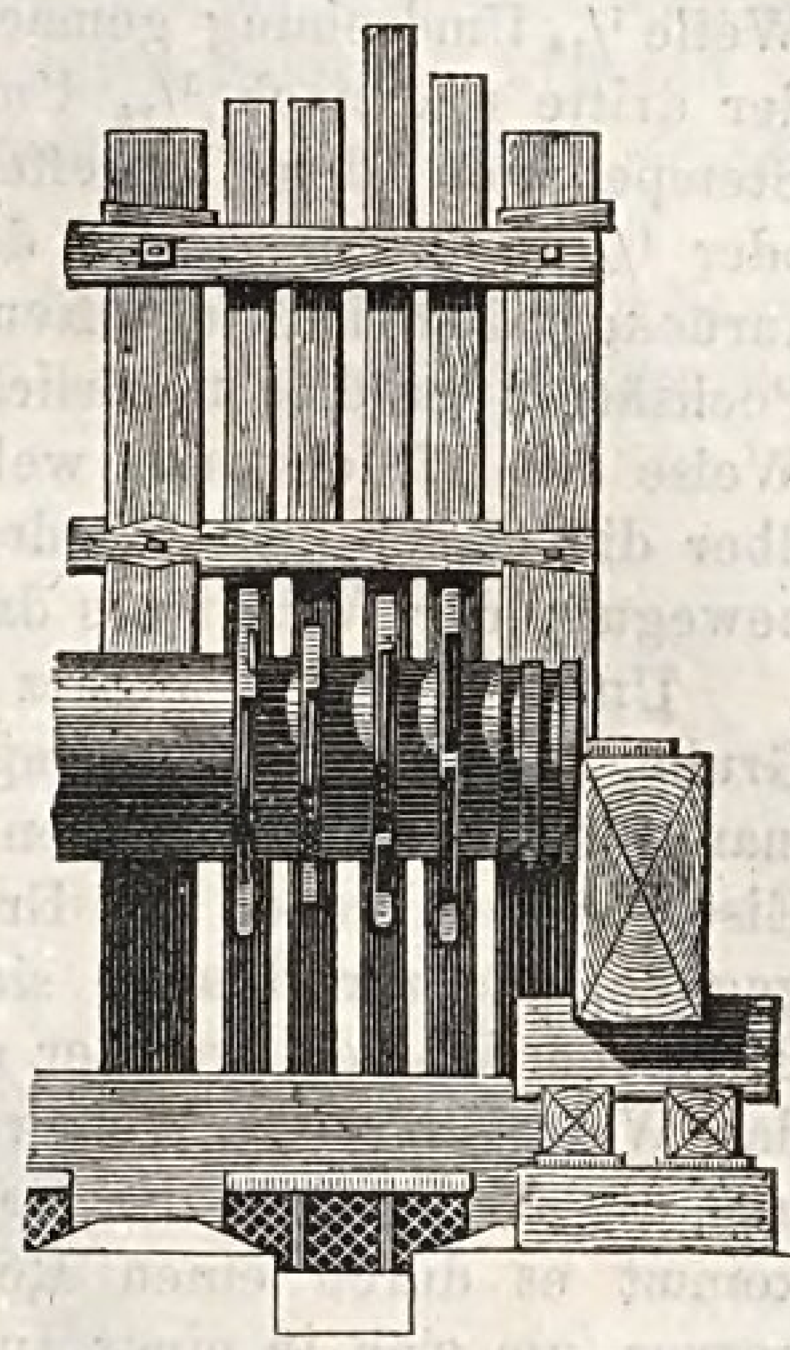


Fig. 295.

Das Pochwerk, welches wir als Beispiel gewählt haben, besteht aus 12 Pochstempeln. Diese wurden in 3 Gruppen zu je 4 abgetheilt; jede solche Gruppe bildet einen sog. Pochsatz. Die Fig. 295 stellt einen einzigen dieser 3 Pochsätze, von vorne gesehen, dar; man sieht in ihr einen Theil der Welle, welche vor den Pochstempeln liegt und 4 Daumenringe, entsprechend den 4 Pochstempeln, trägt. Diese Ringe sind auf der Welle in der Art befestigt, dass die 4 Stempel nicht zu gleicher Zeit, sondern nacheinander gehoben werden. Während einer ganzen Umdrehung der Welle wird jeder Stempel viermal gehoben, sodass die Welle von dem Augenblick an, wo ein Stempel von einem Daumen ergriffen wird, bis zu dem Augenblick, wo ihn der folgende fässt, $^1/_4$ Umdrehung macht. Diese $^1/_4$ Umdrehung denke man sich wieder in vier Theile, also in $^1/_{16}$ Umdrehungen, getheilt. Dann ist die Anordnung der 4 Daumenringe so, dass jeder folgende gegen den vorhergehenden um $^1/_{16}$ Umdrehung verschoben ist. Wenn man daher von dem Moment ausgeht, wo der erste Stempel zur Rechten (Fig. 295) eben von dem Daumen ergriffen wird, so kommt der zweite Stempel in Bewegung, nachdem die

Welle $^1/_{16}$ Umdrehung gemacht hat. Nach $^2/_{16}$ Umdrehungen wird der dritte und nach $^3/_{16}$ Umdrehungen endlich auch der vierte Stempel von dem betreffenden Daumen ergriffen. Nach $^4/_{16}$ oder $^1/_4$ Umdrehung wird der erste Stempel, welcher unterdessen zurückgefallen ist, auf's Neue gehoben u. s. w. Bei den anderen Pochsätzen ist dies natürlich ebenso. Man sieht, dass auf diese Weise der Widerstand, welchen die Welle zu überwinden hat, über die Dauer ihrer Umdrehung vertheilt wird. Die Drehungsbewegung der Welle muss dadurch merklich gleichförmig werden.

Unter jedem Pochsatz befindet sich eine Vertiefung oder Grube, in welche die Stempel fallen; in diese Vertiefung bringt man die zu zerkleinernden Erze. Die schweren Stempel von Eisen stossen gegen die Erzstücke, welchen sie im Fallen begegnen, und zerschlagen sie dadurch in immer kleinere Stücke. Ein Strom Wasser, welcher aus dem Kanal entnommen wird, der das Wasser für das Wasserrad liefert, wird durch die Röhre D und die Rinne E in die Grube geleitet (Fig. 294). Aus dieser kommt es durch einen Rost, welchen Fig. 295 zeigt, wieder hervor, um sich in einer anderen Rinne F (Fig. 294) zu sammeln. Indem dieser Strom Wassers das den Wirkungen der Stempel ausgesetzte Stampfgut durchdringt, reisst er die schon klein gewordenen Theile mit sich fort und führt sie in ein Bassin, in welches die Röhre F mündet.

Durch eine ähnliche Vorrichtung werden die Stempel von Kanonenmetall bewegt, welche bei der Fabrikation des Schiesspulvers gebraucht werden.

§. 196. **Rammen.** — Um Pfähle, die zu irgend einem Zweck bestimmt sind, in den Boden einzutreiben, muss man auf dieselben eine grosse Kraft ausüben, welche die Widerstände, die sich ihrem Eindringen in den Boden entgegensetzen, zu überwinden hat. Es würde sehr schwierig sein, den Druck, der hiezu nöthig ist, durch einen schweren Körper, welcher auf den Kopf des Pfahls gelegt wird, hervorzubringen. Desshalb nimmt man seine Zuflucht zu dem Stoss, durch welchen es möglich wird, den nöthigen Druck mit viel geringeren Massen hervorzubringen. Wenn es sich nur um Pfähle von kleineren Dimensionen handelt, so schlägt man diese einfach mit schweren Hämmern oder auch mit Rammenklötzen, die mit der Hand geführt werden (Handrammen), ein. Aber bei Pfählen von grösserer Länge und Dicke, wie sie bei Wasserbauten, bei dem Baue von Brücken u. s. w. in die Erde getrieben werden müssen, ist man genöthigt, Maschinen anzuwenden, welche gewöhnlich Rammen genannt werden. Mit

Hilfe derselben wird ein sehr schwerer Körper emporgehoben und dann auf den Kopf des Pfahls herabfallen gelassen, wodurch ein Stoss hervorgebracht wird, dessen Stärke im Verhältniss zu dem zu überwindenden Widerstand steht.

Die einfachste Ramme ist diejenige, welche mit dem Namen **Zugramme** bezeichnet wird, und welche durch Fig. 296 dar-

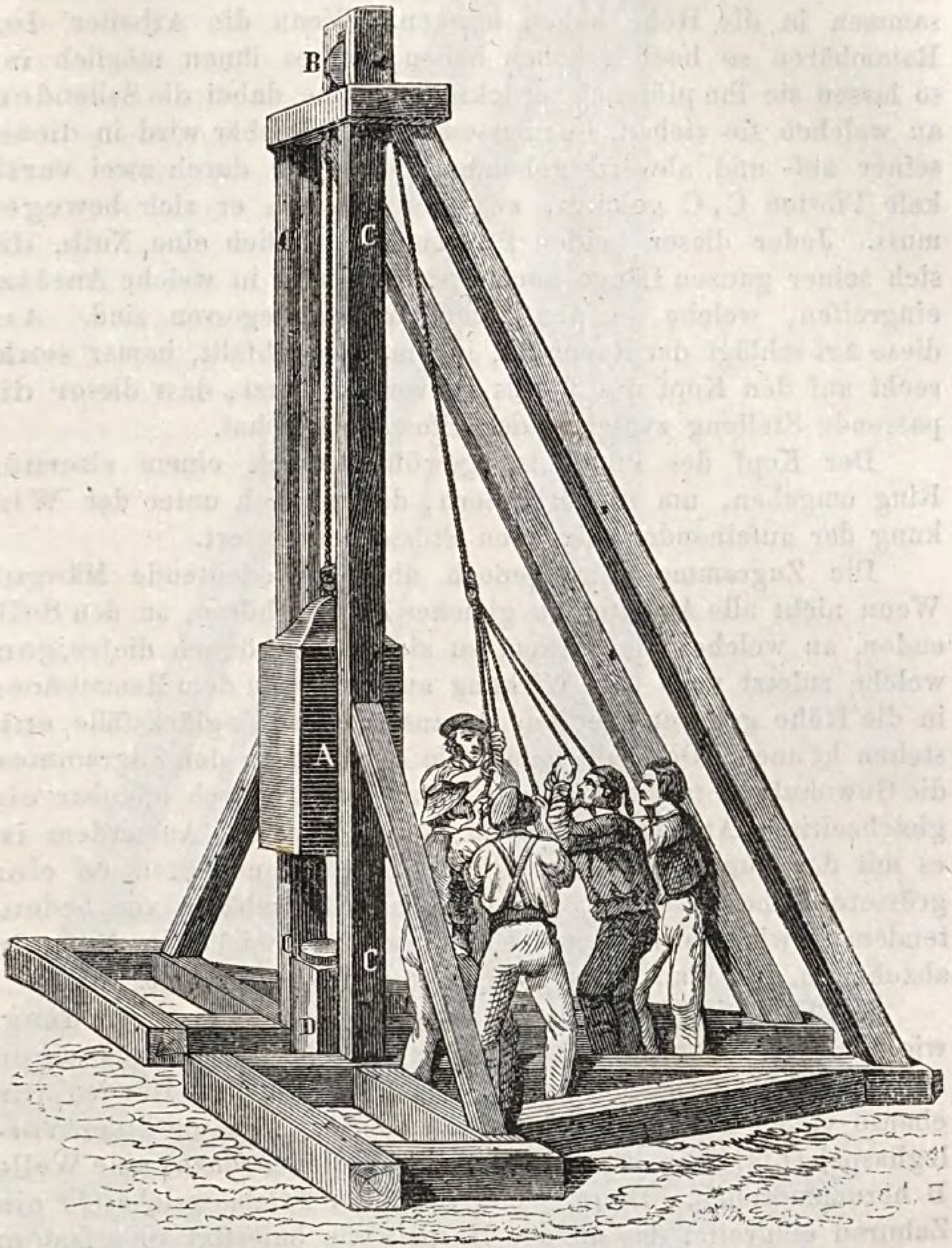


Fig. 296

gestellt ist. Ein schwerer Block A von Gusseisen, manchmal auch blos ein mit Eisen beschlagener Holzblock, welcher der Rammbär oder Hoyer heisst, ist an das eine Ende eines Seils festgemacht. Dieses Seil geht von ihm aus in die Höhe und legt sich oben über eine Rolle B, von welcher es wieder abwärts geht; unten theilt es sich in mehrere Theile, an welchen ebenso viele Arbeiter wirken und auf diese Weise den Rammbären zusammen in die Höhe heben können. Wenn die Arbeiter den Rammbären so hoch gehoben haben, als es ihnen möglich ist, so lassen sie ihn plötzlich zurückfallen, ohne dabei die Seilenden, an welchen sie ziehen, loszulassen. Der Rammbär wird in dieser seiner auf- und abwärts gehenden Bewegung durch zwei verticale Pfosten C, C geleitet, zwischen welchen er sich bewegen muss. Jeder dieser beiden Pfosten hat nämlich eine Nuth, die sich seiner ganzen Länge nach erstreckt, und in welche Ansätze eingreifen, welche an den Rammbären angegossen sind. Auf diese Art schlägt der Rammbär, indem er herabfällt, immer senkrecht auf den Kopf des Pfahls D, vorausgesetzt, dass dieser die passende Stellung zwischen den Pfosten C, C hat.

Der Kopf des Pfahls ist gewöhnlich mit einem eisernen Ring umgeben, um zu verhindern, dass er sich unter der Wirkung der aufeinander folgenden Stösse zersplittert.

Die Zugramme zeigt jedoch nicht unbedeutende Mängel. Wenn nicht alle Arbeiter zu gleicher Zeit aufhören, an den Seilenden, an welchen sie wirken, zu ziehen, so können diejenigen, welche zuletzt noch eine Wirkung ausüben, von dem Rammbären in die Höhe gerissen werden, woraus schwere Unglücksfälle entstehen können. Desshalb haben die Arbeiter an den Zugrammen die Gewohnheit, taktmässig laut zu zählen, wodurch offenbar ein gleichzeitiger Angriff leichter zu Stande kommt. Ausserdem ist es mit der Zugramme nicht möglich, den Rammbären auf eine grössere Höhe zu heben; man muss also Rammbären von bedeutendem Gewicht anwenden. Um diesen verschiedenen Mängeln abzuhelfen, hat man die sog. Kunstrammen erdacht.

§. 197. Die Kunstramme hat eine ähnliche Einrichtung, wie die Zugramme; aber anstatt dass sich das Seil auf der einen Seite in mehrere Enden theilt, welche sich in den Händen von ebenso vielen Arbeitern befinden, wickelt es sich um einen Vorleghaspel (Fig. 297). Zwei Kurbeln A, A dienen dazu, eine Welle B herumzudrehen. Diese Welle trägt ein Trieb, welches in ein Zahnrad eingreift, das an der Haspelwelle befestigt ist. Indem man also die Kurbeln dreht, kann man den Rammbären so hoch

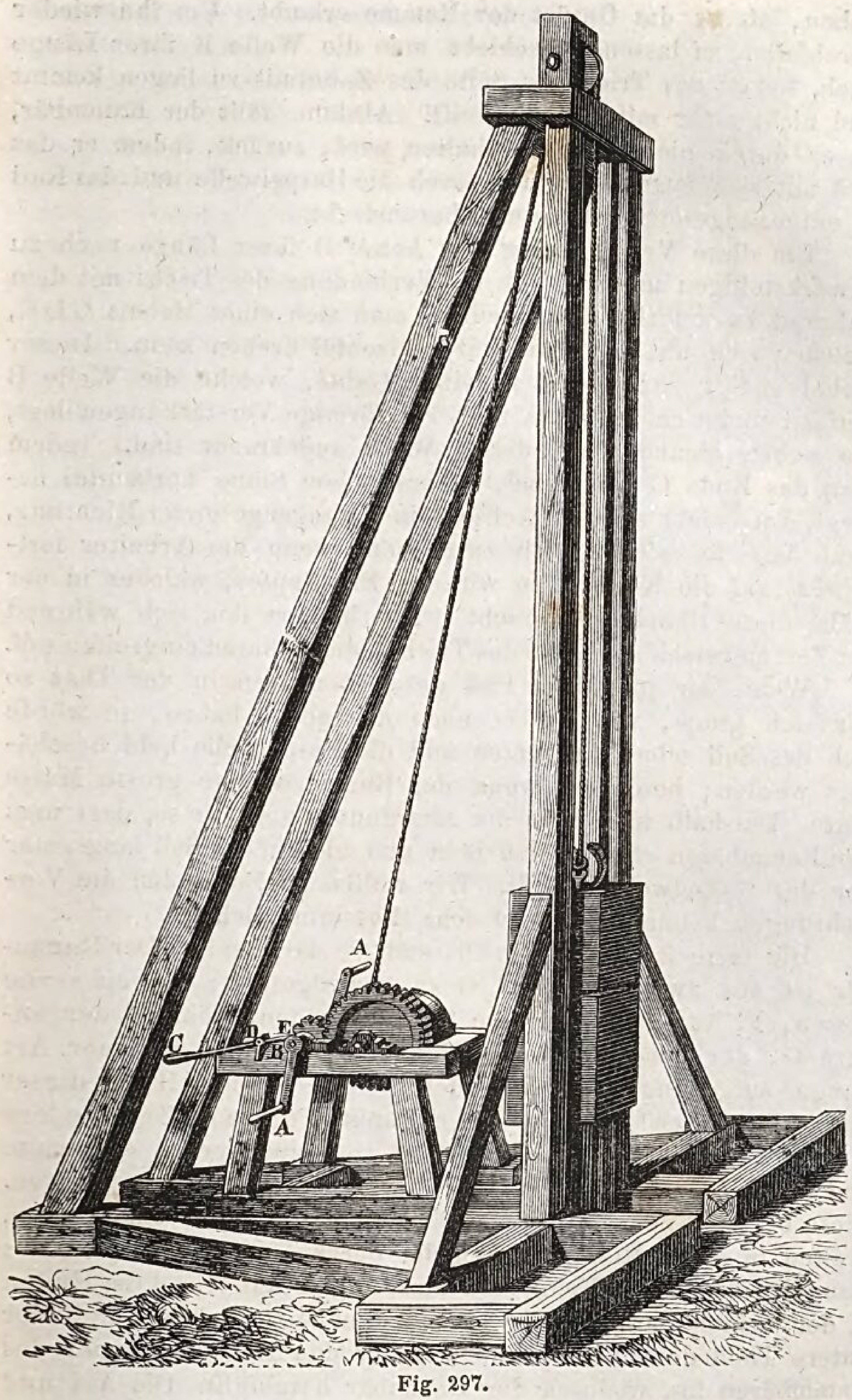


Fig. 297.

heben, als es das Gerüst der Ramme erlaubt. Um ihn wieder herabfallen zu lassen, verschiebt man die Welle B ihrer Länge nach, sodass das Trieb zur Seite des Zahnrads zu liegen kommt und nicht mehr mit ihm eingreift. Alsdann fällt der Rammbär, da er durch nichts mehr gehalten wird, zurück, indem er das Seil mit sich fortreisst und dadurch die Haspelwelle und das Rad in entgegengesetzter Richtung herumdreht.

Um diese Verschiebung der Achse B ihrer Länge nach zu bewerkstelligen und dadurch die Verbindung des Triebs mit dem Zahnrad zu unterbrechen, bedient man sich eines Hebels CDE, welcher sich um den Punkt D horizontal drehen kann. Dieser Hebel endigt sich bei E in einer Gabel, welche die Welle B umfasst und sich zwischen zwei ringförmige Verstärkungen legt, die neben einander auf dieser Welle angebracht sind. Indem man das Ende C des Hebels in passendem Sinne horizontal bewegt, verschiebt sich die Achse B in entgegengesetzter Richtung, ohne dass sie aufhört, sich zu drehen, wenn die Arbeiter fortfahren, auf die Kurbeln zu wirken. Ein Zapfen, welcher in der Nähe dieses Hebels angebracht ist, verhindert ihn, sich während der Zeit zu verschieben, wo das Trieb in das Zahnrad eingreifen soll.

Wenn der plötzliche Fall des Rammbären in der That so vor sich ginge, wie wir es eben angegeben haben, so würde sich das Seil schnell abnützen und die Haspelwelle bald beschädigt werden, besonders wenn der Rammbär eine grosse Masse hätte. Desshalb trifft man die Anordnung meistens so, dass man den Rammbären allein fallen lässt und hierauf das Seil langsamer von der Haspelwelle abrollt. Wir wollen im Folgenden die Vorrichtungen kennen lernen, welche dies ermöglichen.

Die erste ist durch Fig. 297 und 298 dargestellt. Der Rammbär ist aus zwei Theilen F, G zusammengesetzt; der eine von diesen, F, ist direkt mit dem Seil verbunden, während der andere G, der den Körper des Rammbären bildet, an einer Art Zange aufgehängt ist. Von den beiden Theilen H, H dieser Zange kann sich jeder um einen Punkt O drehen. Zwei Federn I suchen fortwährend die Enden H von einander zu entfernen und folglich die Enden K in Berührung mit einander zu erhalten. Diese beiden Enden K, welche eine hakenförmige Gestalt haben, greifen in einen Ring, welchen der obere Theil des Körpers des Rammbären trägt. Wenn man durch irgend ein Mittel die Enden H der beiden Zangentheile einander nähert, so öffnet sich der untere Theil derselben und lässt daher den Ring am Körper des Rammbären los, wodurch der Rammbär herabfällt. Die Art und

Weise, mit der Kunstramme zu arbeiten, ist nun folgende:

Der Ring am Körper des Rammbären wird in die Haken K, K der Zange eingehängt; hierauf werden die Kurbeln gedreht und der Rammbär gehoben. Wenn sich derselbe dem obersten Theile des Gerüstes nähert, so legen sich die Enden H der Zange in eine Oeffnung P (Fig. 298), welche sich mehr und mehr verengt; indem also der Rammbär fortfährt zu steigen, werden die beiden Theile der Zange genöthigt, sich oben einander zu nähern, unten dagegen von einander zu entfernen und folglich den Ring, der unten eingehängt ist, loszulassen. Der Körper des Rammbären fällt also allein herab. Nun hebt man mittelst des Hebels CDE die Verbindung zwischen den Kurbeln und der Haspelwelle auf, wodurch auch der Kopf des Rammbären herabfällt und das Seil nach sich zieht. In dem Moment, wo derselbe auf den Körper des Rammbären trifft, öffnet sich die Zange in Folge der eigenthümlichen Form, welche ihren unteren Theilen gegeben wurde, von selbst; der Ring wird von neuem ergriffen, und indem man wieder beginnt, die Kurbeln zu drehen und den Rammbären zu heben, kann man einen neuen Schlag führen u. s. f.

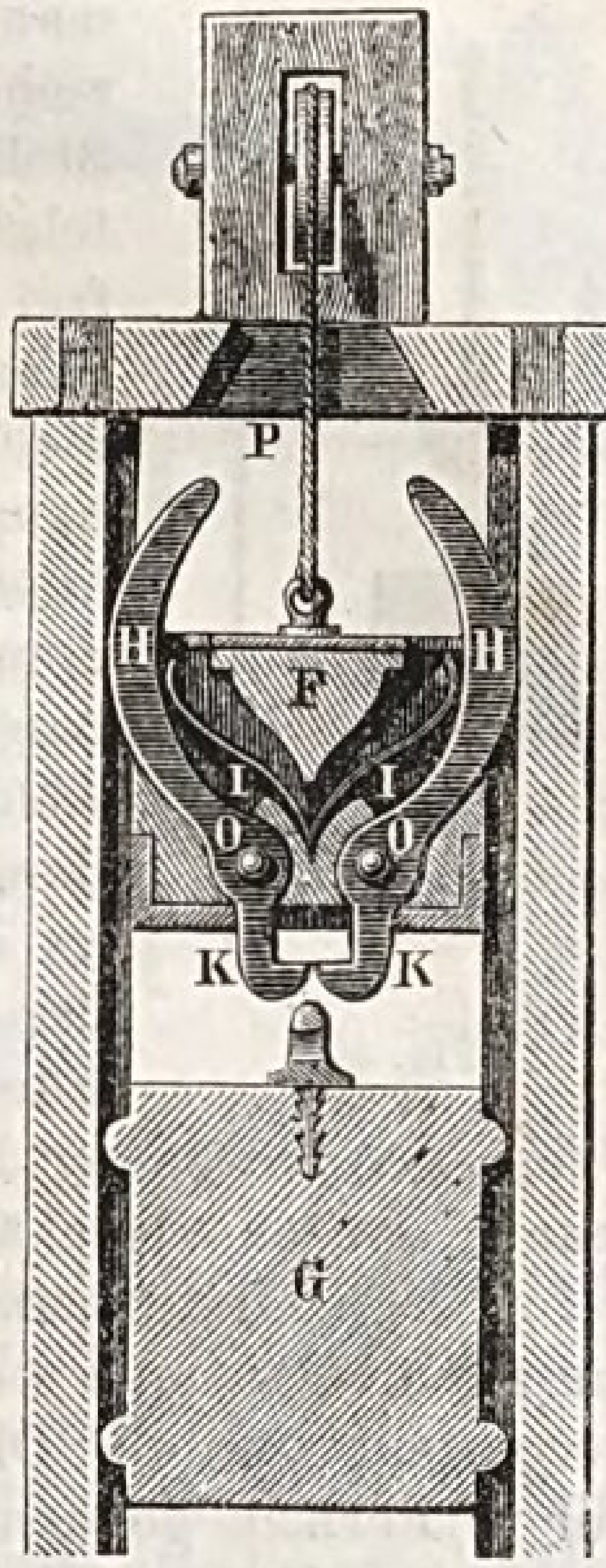


Fig. 298.

Die zweite Vorrichtung, die nun beschrieben werden soll, ist einfacher als die vorhergehende und wird häufiger angewandt; sie ist in Fig. 299 und 300 dargestellt. Das Seil trägt an seinem Ende *a* einen Haken *b*, welcher den Ring ergreift, der oben am Rammbären angebracht ist. Dieser Haken verlängert sich über seinen Befestigungspunkt *a* am Seil hinaus bis *c*, und von diesem Punkt geht ein zweites Seil *cd* herab. Wenn der Rammbär bis auf eine genügende Höhe gehoben ist, darf

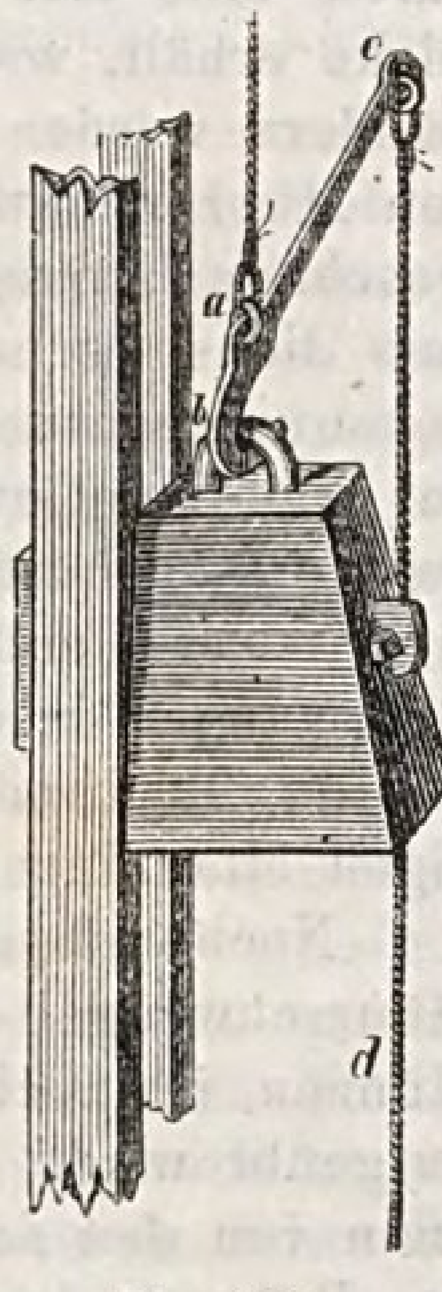


Fig. 299.

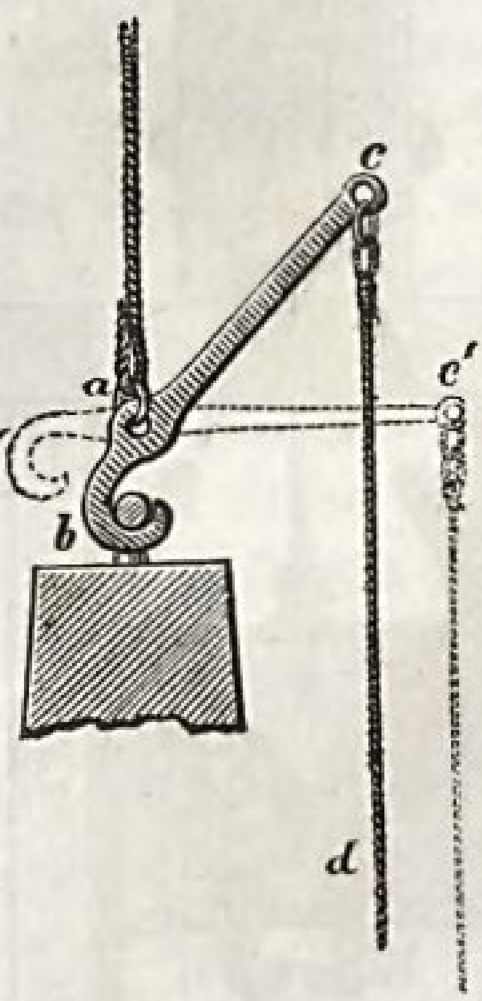


Fig. 300.

man nur an dem Seile *cd* von oben nach unten ziehen; hiedurch wird der Haken aus der Stellung *bc* in die *b′c′* (Fig. 300) geführt und folglich der Rammbär ausgehängt, der nun frei herabfallen kann. Das Seil *cd* dient alsdann auch noch dazu, den Haken herunter zu ziehen, damit man den Rammbären wieder einhängen nnd die Operation auf's Neue beginnen kann. Es ist leicht einzusehen, dass es nicht einmal nothwendig ist, dass Jemand in dem Augenblick, wo der Rammbär die Höhe, von welcher er herabfallen soll, erreicht hat, an dem Seile *cd* zieht. Man kann auch das Seil an seinem freien Ende an einem der Pfosten der Maschine befestigen und ihm eine solche Länge geben, dass es sich in Folge der aufsteigenden Bewegung des Rammbären genau in dem Moment anspannt, wo er ausgehängt werden soll.

§. 198. **Prägmaschinen.** — Bei der Anfertigung der Münzen muss zunächst eine Legirung von bestimmter Zusammensetzung hergestellt werden. Diese Legirung wird geschmolzen und hierauf in Formen gegossen, wodurch man flache Stangen, Zaine genannt, erhält. Diese werden sodann ausgewalzt und zuletzt durch eine Art Drahtzug gezogen, bis man Bänder von der Dicke erhält, wie sie die Münzen bekommen sollen. Aus diesen Bändern werden alsdann Platten von der Grösse der zu fertigenden Münzen mittelst eines sog. Durchschnitts, einer Art Stanzmaschine, herausgeschnitten. Nachdem man sich versichert hat, dass die so erhaltenen Platten (Münzplatten, auch Schrötlinge genannt) genau oder doch innerhalb der gesetzlichen Grenzen das richtige Gewicht haben, werden sie einem starken Druck zwischen gehärteten Stahlstempeln unterworfen, die vertiefte Gravirungen enthalten; dadurch werden auf der Münzplatte jene Gravirungen in erhabener Form erhalten. Wir betrachten hier nur die zu dieser letzteren Operation, dem Prägen, nothwendigen Maschinen.

Noch vor kurzer Zeit wurde in allen Münzstätten der sog. Münzschwengel oder Münzbalancier angewandt, bei welchem die Münzen ihr Relief mittelst eines Stosses erhalten, der auf sie ausgeübt wird. Dieselben sind aber in neuerer Zeit fast allgemein von den sog. Münzpressen verdrängt worden, bei welchen das Prägen, ohne Anwendung eines Stosses, blos mittelst Druck

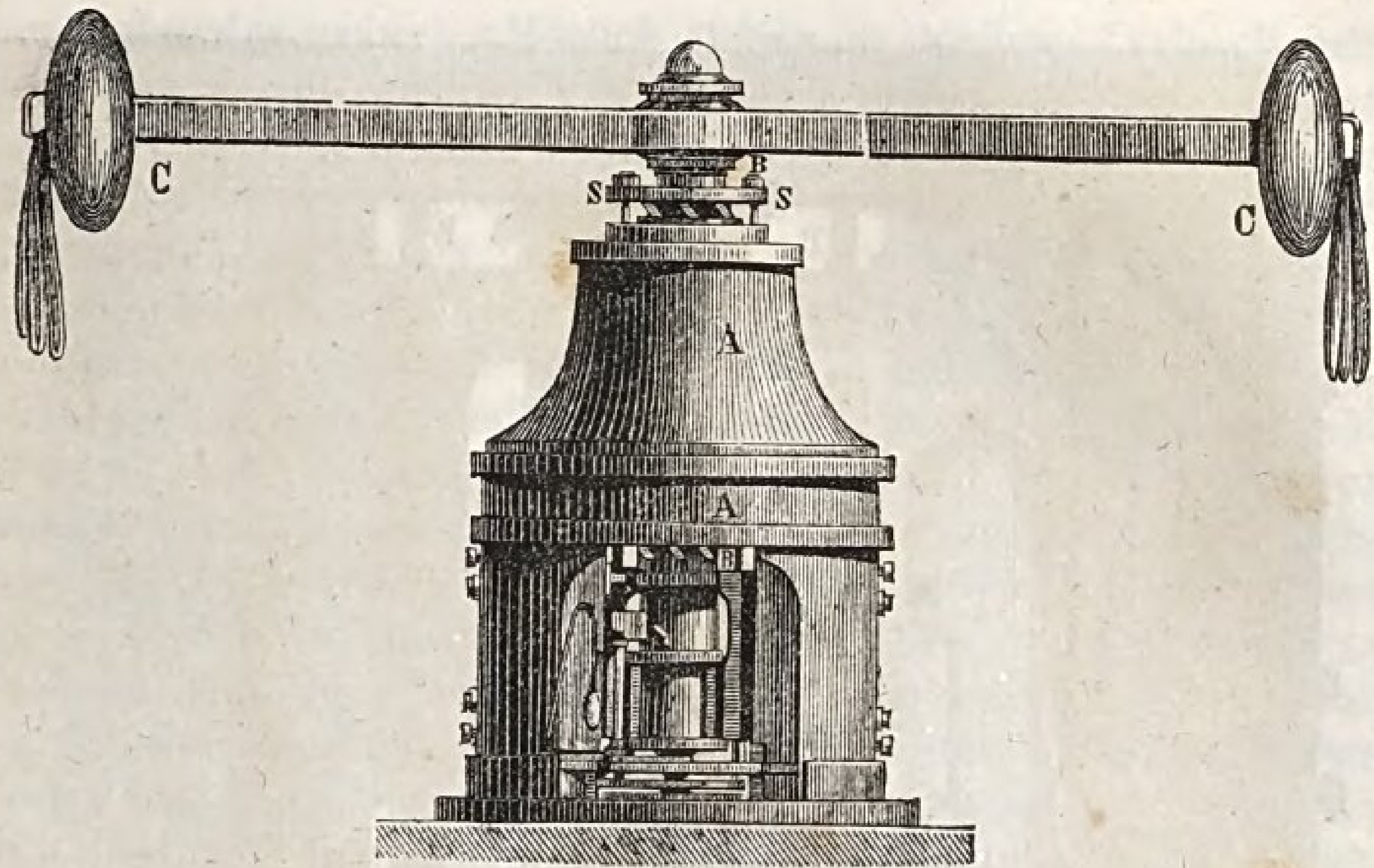


Fig. 301.

geschieht. Diese Maschinen sind zuerst von *Uhlhorn* in Grevenbroich bei Aachen gebaut worden und werden daher oft nach ihm benannt. Fast alle Münzen haben zuerst von ihm solche Prägmaschinen bezogen und dann zum Theil gleiche, im Wesentlichen unveränderte Maschinen darnach gebaut. Der Münzbalancier wird heutzutage fast nur noch zum Prägen von Medaillen angewendet. Wir wollen im Folgenden beide Maschinen kennen lernen und beginnen mit dem Münzschwengel.

Der Münzschwengel ist vollständig in Fig. 301 abgebildet. Die Fig. 302 zeigt einen Theil der vorhergehenden nochmals in grösserem Maassstab, und die Fig. 303 ist ein Grundriss und Durchschnitt, in demselben Maassstab ausgeführt wie Fig. 302. Die Maschine besteht im Wesentlichen aus einem Gestell von Bronze, AA, welches in seinem oberen Theil eine Schraubenmutter bildet; einer Schraubenspindel B, welche sich in dieser Mutter dreht, und endlich aus einem Hebel oder Balancier C C, welcher horizontal auf dem Kopf der Schraube befestigt ist. Dieser Balancier trägt an beiden Enden zwei linsenförmige Massen von Bronze, an welchen lederne Riemen befestigt sind, welche dazu dienen, den Balancier in Bewegung zu setzen. Mittelst dieser Riemen wird der Balancier in solchem Sinne, dass die Schraube abwärts geht, in rasche Drehung versetzt; er behält dieselbe so lange bei, bis die abwärts gehende Schraube auf ein Hinderniss stösst, welches sie und in Folge dessen auch

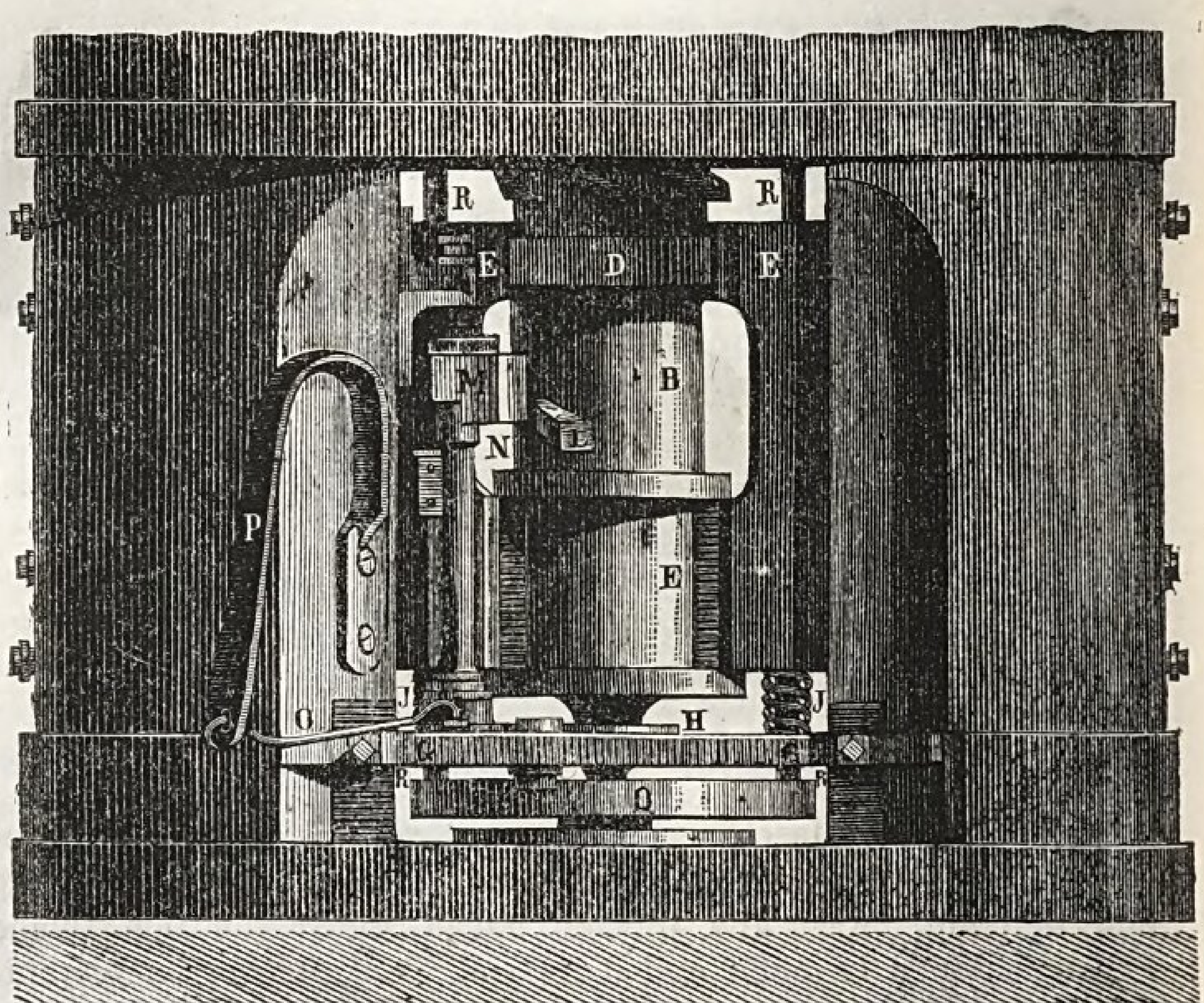


Fig. 302.

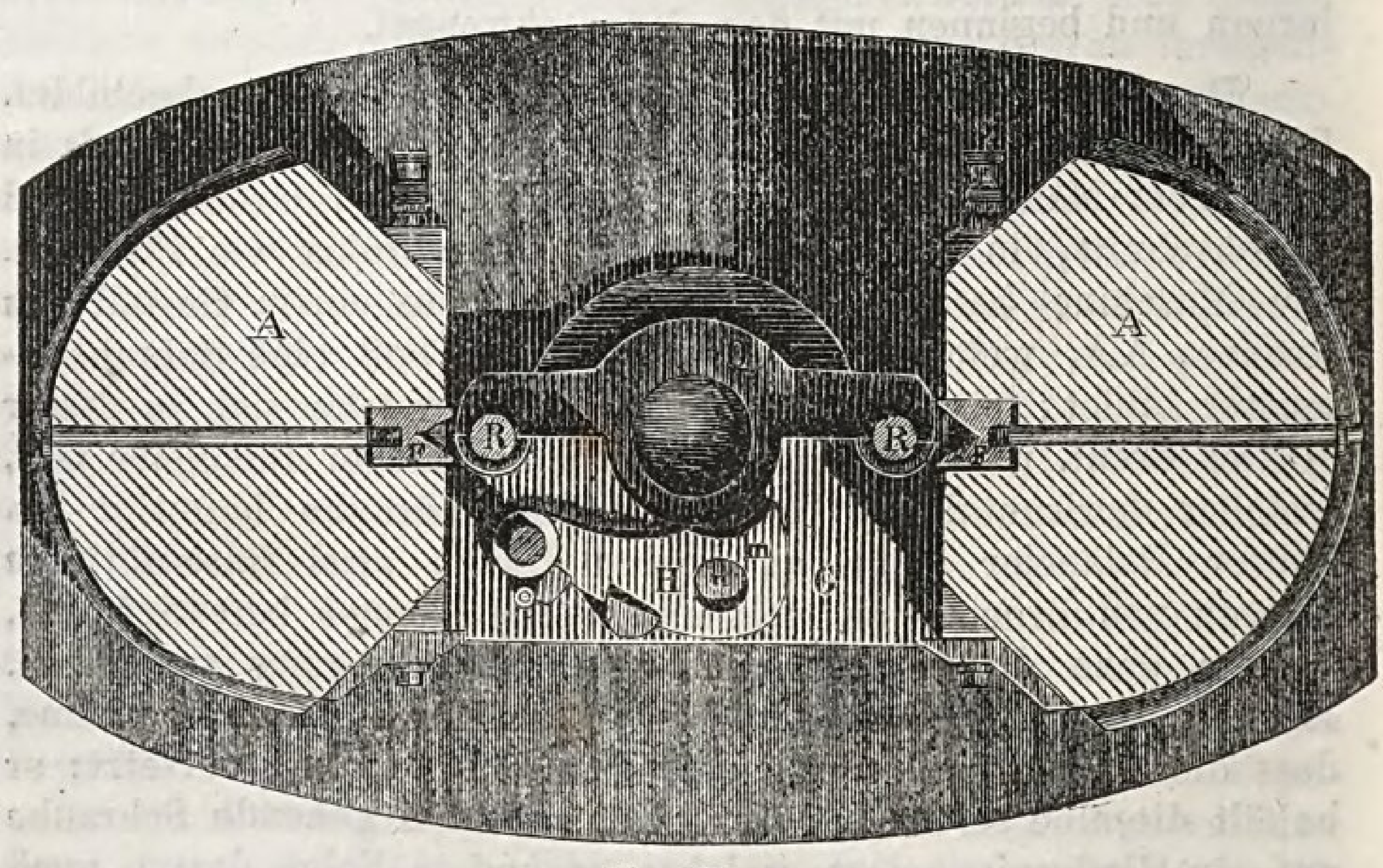


Fig. 303 .

den Balancier zwingt, plötzlich stehen zu bleiben. Dadurch entsteht ein Stoss und in Folge dessen wird von dem untersten Theil der Schraube ein sehr starker Druck gegen den Körper ausgeübt, welcher Schraube und Balancier so plötzlich zum Stillstand gebracht hat.

Die Massen von Bronze an den Enden des Balanciers CC haben die Aufgabe, die Heftigkeit dieses Stosses zu vermehren. Wir können uns auf folgende Weise von der Art ihrer Wirksamkeit Rechenschaft geben. Denken wir uns, eine dieser beiden Massen stosse mit der Geschwindigkeit, welche sie besitzt, nachdem der Balancier in Bewegung gesetzt worden ist, direkt auf ein Hinderniss, das sich ihrer Weiterbewegung entgegensetzt, so entsteht dadurch ein Stoss. Die Stärke dieses Stosses ist offenbar proportional der Grösse der Masse, sowie auch proportional der Geschwindigkeit, welche dieselbe vor dem Stosse besass. Wenn man nun beachtet, dass dieselbe Masse den Stoss erst durch Vermittlung des Hebels und der Schraube hervorbringt, so wird man leicht einsehen, dass die Grösse des Stosses, welchen sie unter diesen Umständen erzeugt, sich zur Grösse desjenigen verhält, welchen sie direkt hervorbringen würde, wie die Grösse des Weges, welchen das Ende des Hebels bei einer Umdrehung beschreibt, zur Ganghöhe der Schraube. Man sieht daraus, dass durch Hinzufügung von schweren Massen an den beiden Enden des Balanciers der Stoss, welchen die Schraube und der Balancier ohne diese Massen ausgeübt haben würden, bedeutend vergrössert wird.

Die gehärteten Stahlstücke, welche die vertiefte Gravirung des Gepräges enthalten, das beide Seiten der Münze bekommen sollen, heissen Stempel. Der eine derselben ist an dem unteren Theil der Schraube befestigt, der andere befindet sich unter diesem. Auf dem letzteren liegt die Münzplatte; im Moment des Stosses wird dieselbe zwischen beiden Stempeln stark zusammengepresst und drückt sich dadurch in die vertiefte Gravirung der beiden Stempel hinein. Zu gleicher Zeit ist die Münzplatte von einem ringförmigen Stück, dem sog. Prägring, umgeben, welcher verhindert, dass sie zu breit auseinander gequetscht wird. Die innere Fläche dieses Rings, an welche sich der Rand der Münze anlegt, ist entweder glatt polirt, oder mit der Gravirung der Buchstaben oder Verzierungen, welche der Rand der Münze in erhabener Form erhalten soll, versehen. Im ersteren Fall sind die Münzplatten schon vorher mittelst der sog. Rändelmaschine mit der dann immer vertieften Schrift oder Verzierung auf ihrem

Rande versehen worden. Bei diesen letzteren Maschinen wird einfach die Münzplatte, welche auf einem glatten Tisch liegt, zwischen zwei Backen unter starkem Aneinanderdrücken derselben fortgerollt; diese Backen tragen auf den einander zugekehrten Seiten die Buchstaben oder Verzierungen, welche dem Rande der Münze eingedrückt werden sollen, in erhabener Form. Im zweiten der oben genannten beiden Fälle wird die Prägung des Randes zugleich mit der der Seitenflächen ausgeführt.

Der obere Prägstempel, welcher mit der Schraube beweglich ist, darf sich natürlich nicht drehen, sondern blos abwärts bewegen. Zu diesem Zweck ist der untere Theil der Schraubenspindel mit einer kreisförmigen Rinne in Gestalt eines Rollenhalses versehen, welche von einem Halsring D (Fig. 302) umfasst wird. Dieser Halsring ist an einem Stück E E befestigt, das die Prägbüchse genannt wird, und das auf beiden Seiten durch zwei Schlitten begrenzt ist, die in Coulissen F,F (Fig. 303) vertikal geführt werden. Wenn daher die Schraube in Bewegung gesetzt wird, so dreht sie sich in dem Halsring D; dieser aber, welcher sich nicht mitdrehen kann, wird dadurch, je nach dem Sinn, in welchem die Schraube gedreht wird, auf- oder abwärts bewegt und theilt diese Bewegung der Prägbüchse mit. An dem untersten Theil dieser Prägbüchse ist der obere Stempel befestigt.

Der untere Stempel ist einfach auf ein bewegliches Stück gesetzt, welches eine wichtige Rolle spielt. Dieses Stück, dessen untere Fläche convex ist, erfüllt genau eine ebenso geformte, concave Höhlung in einer schweren Stahlplatte, welche die Mitte des unteren Theils des Gestells A A einnimmt. Im Moment des Stosses stellt sich dieses Stück in der Höhlung, welche es enthält, so, dass die obere Fläche des unteren Stempels parallel zur unteren Fläche des oberen Stempels ist, sodass der Druck auf die verschiedenen Theile der Oberfläche der Münzplatte gleichmässig vertheilt wird.

Wenn der Prägring zur Prägung erhabener Buchstaben am Rande der Münze dienen soll, so darf er natürlich nicht aus einem einzigen Stahlstück bestehen, weil sonst die Münzen, nachdem sie geprägt sind, nicht mehr aus ihm herausgehen würden. Man zerschneidet desshalb diesen Prägring in drei gleiche Theile; dieselben sind an ihrer äusseren Fläche konisch zugeschliffen und liegen im Innern eines hohlen Kegelrumpfes, dessen grössere Grundfläche nach oben gekehrt ist. In dieser Höhlung werden sie durch Federn unterstützt, welche sie fortwährend zu heben und also von einander zu entfernen suchen; wenn aber von oben

her ein Druck ausgeübt wird, wie es in dem Moment geschieht, wo das Prägen vor sich geht, so geben diese Federn nach, und die Stücke des Prägrings, indem sie abwärts geschoben werden, nähern sich einander so weit, dass alle Unterbrechung zwischen ihnen verschwindet und sie nur einen einzigen ganzen Ring bilden.

Die Maschine ist so eingerichtet, dass sie selbst die Münzplatten an den Platz bringt, den sie einnehmen müssen, um geprägt zu werden, und sie wieder abhebt, sobald sie geprägt sind. Beide Operationen werden in der Zwischenzeit ausgeführt, in welcher sich die Schraube B erhebt. In gleicher Höhe mit der oberen Fläche des zerschnittenen Prägrings befindet sich ein Tisch G, der aus zwei Theilen besteht. In Fig. 303 hat man vorausgesetzt, dass der hintere Theil dieses Tisches abgehoben ist, um das unter ihm Gelegene sichtbar zu machen. Auf diesem Tisch bewegt sich ein Stück H, welches den Namen Zubringer führt, und welches dazu gehört, das soeben geprägte Stück mit Hilfe der Schweifung *m* herauszustossen und eine neue Münzplatte, die vorher schon in das Loch *n* gebracht worden ist, in die Mitte des Prägrings zu setzen. Damit aber das geprägte Stück durch die Schweifung *m* des Zubringers herausgestossen werden kann, muss dasselbe zuerst über den Prägring herausgehoben werden. Zu diesem Zweck kann der untere Stempel mittelst einer Platte Q gehoben werden. An dieser Platte sind zwei Stäbe R, R befestigt, welche, sich vertikal erhebend, frei durch die ganze Maschine hindurch gehen und sich in einen Halsring SS (Fig. 301) endigen. Wenn die Schraube B in die Höhe geht, so drücken die Enden ihrer Gänge den Halsring SS von unten nach oben. Aber nach geringer Drehung dringen diese Gänge in Windungen ein, die in den Halsring geschnitten sind; in Folge dessen bleibt derselbe während der ganzen Zeit, in welcher die Schraube ihre Bewegung fortsetzt, stehen und hält so die Platte Q in solcher Höhe, dass die gravirte Seite des unteren Stempels in gleicher Höhe mit der Fläche des Tisches G liegt.

Der Zubringer erhält seine Bewegung durch einen Daumen L, der an der Schraube B befestigt ist, und welcher während der aufsteigenden Bewegung dieser Schraube einen Flügel M ergreift. Dieser Flügel, der sich gegen einen Vorsprung, den die vertikale Welle N trägt, stützt, dreht diese Welle mit herum, und mit ihr auch den Zubringer, welcher an ihrem unteren Ende befestigt ist. Dieser stösst dadurch das geprägte Geldstück hinweg und legt die in dem Loche *n* befindliche Münzplatte auf den unteren Stempel. In dieser Lage bleibt er einen Augenblick stehen, da

unterdessen der Flügel M bei der fortgesetzten Drehung der Schraube den Daumen L nur noch an seiner äussersten cylindrischen Fläche berührt und daher nicht mehr von ihm mitgenommen wird. Zu gleicher Zeit aber erhebt ein Vorsprung der Schraube B die ganze Achse N nebst dem Zubringer, und sobald dies bis auf die genügende Höhe geschehen ist, verlässt der Daumen L den Flügel M ganz, und es wird nun der Zubringer sammt der Achse N und dem Flügel M durch den Haken O, der durch die Feder P gezogen wird, wieder nach vorn geführt. Bei dieser rückgängigen Bewegung bleibt aber der Zubringer fortwährend gehoben und geht desshalb über die Münzplatte, die er vorher auf den unteren Stempel gelegt hat, hinweg. Wenn nun die Schraube B herabgeht, um die Münze zu prägen, so senkt sich auch der Zubringer wieder; zugleich wird zwar der Flügel M von dem Daumen L ergriffen; aber er kann der Bewegung desselben folgen, ohne die Achse N mitzunehmen und wird, nachdem er von dem Daumen verlassen ist, von selbst durch eine Feder in seine ursprüngliche Lage zurückgeführt, sodass er bei der folgenden aufsteigenden Bewegung der Schraube auf's Neue von diesem Daumen ergriffen werden kann. Zugleich haben sich auch der Halsring S S und die Platte Q wieder gesenkt und den unteren Prägstempel wieder auf seine Unterlage gesetzt; mit demselben ist auch die Münzplatte herabgegangen, sodass sie in das Innere des Prägringes zu liegen und folglich die Lage wieder einnimmt, wie es zum Prägen erforderlich ist.

§. **199.** Wir gehen jetzt zur Beschreibung der Münzpresse über und wählen als Beispiel eine von denen, welche in der Münze in Paris in Thätigkeit sind und nach dem *Uhlhorn*'schen System von *Thonnelier* gebaut wurden. Die Fig. 304 gibt einen Durchschnitt dieser Maschine, welcher den ganzen Mechanismus zeigt. Die Figuren 305 und 306 stellen einige Details derselben dar. Es sind zwar seit der Zeit, dass diese Maschine in der Münze von Paris in Thätigkeit ist, mehrere Veränderungen an Nebentheilen derselben gemacht worden, aber die wesentlichsten Theile derselben, diejenigen, welche den zum Prägen nothwendigen Druck auszuüben haben, sind unverändert geblieben.

Die Münzpresse unterscheidet sich von dem Münzschwengel nur durch die Art und Weise, wie der Druck hervorgebracht wird. Am Ende einer Welle, welche durch eine Dampfmaschine in Drehung versetzt wird und welche ein Schwungrad Z trägt, befindet sich eine Kurbel G. Diese Kurbel wirkt mittelst der Bleuelstange F auf den Hebel H, welchem sie eine oscillirende

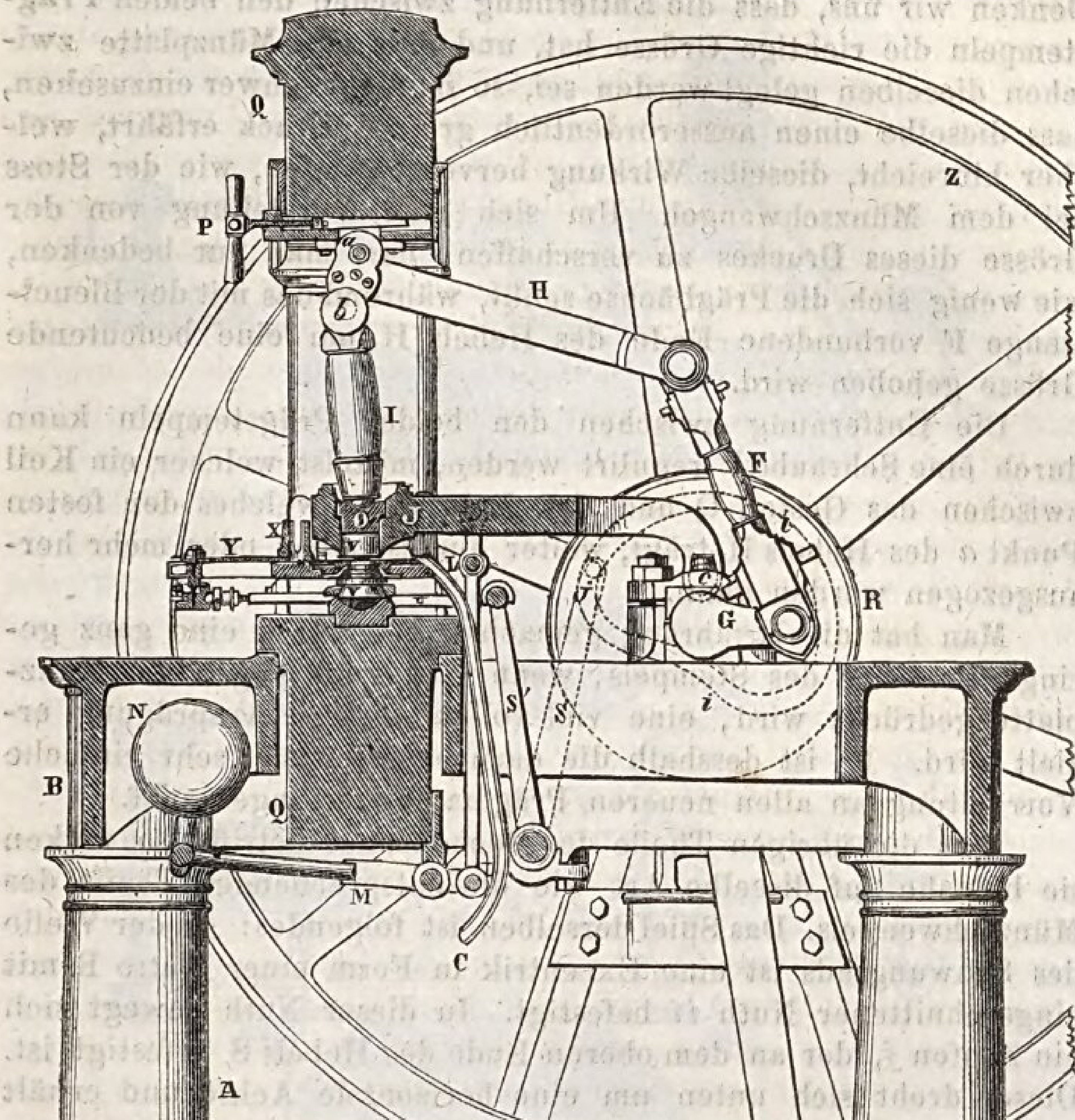


Fig. 304.

Bewegung um den festen Punkt *a* ertheilt. Der untere Theil *b* dieses Hebels stützt sich gegen das obere Ende einer Säule I, deren unteres Ende mittelst eines Gelenkes mit der Prägbüchse J in Verbindung steht. Die Prägbüchse, welche den oberen Stempel trägt, befindet sich an dem Ende eines Hebels, der um den Punkt *c* drehbar ist, und wird durch zwei Gegengewichte N, deren Wirkung mittelst des Hebels M und der Gabel L auf sie übertragen wird, fortwährend von unten nach oben gegen die Säule I angedrückt. Wenn die Kurbel G den Hebel H erhebt, so sucht derselbe die Säule I sammt der Prägbüchse niederzudrücken.

Denken wir uns, dass die Entfernung zwischen den beiden Prägstempeln die richtige Grösse hat, und dass eine Münzplatte zwischen dieselben gelegt worden sei, so ist nicht schwer einzusehen, dass dieselbe einen ausserordentlich grossen Druck erfährt, welcher hinreicht, dieselbe Wirkung hervorzubringen, wie der Stoss bei dem Münzschwengel. Um sich eine Vorstellung von der Grösse dieses Druckes zu verschaffen, darf man nur bedenken, wie wenig sich die Prägbüchse senkt, während das mit der Bleuelstange F verbundene Ende des Hebels H um eine bedeutende Grösse gehoben wird.

Die Entfernung zwischen den beiden Prägstempeln kann durch eine Schraube P regulirt werden, mittelst welcher ein Keil zwischen das Gestell Q und das Stahlstück, welches den festen Punkt *a* des Hebels H trägt, weiter eingeschoben oder mehr herausgezogen werden kann.

Man hat die Erfahrung gemacht, dass durch eine ganz geringe Drehung des Stempels, wenn er bereits gegen die Münzplatte gedrückt wird, eine viel vollkommenere Ausprägung erzielt wird. Es ist desshalb die dazu erforderliche sehr einfache Vorrichtung an allen neueren Prägmaschinen angebracht.

Was die übrigen Theile des Mechanismus betrifft, so wirken sie beinahe auf dieselbe Art wie die entsprechenden Theile des Münzschwengels. Das Spiel derselben ist folgendes: An der Welle des Schwungrads ist eine Excentrik in Form einer Platte R mit eingeschnittener Nuth *ii* befestigt. In dieser Nuth bewegt sich ein Zapfen *j*, der an dem oberen Ende des Hebels S befestigt ist. Dieser dreht sich unten um eine horizontale Achse und erhält in Folge der Form der Excentrik *ii* eine oscillirende Bewegung um diese Achse. Diese Bewegung wird auf den Hebel S′ übertragen, der an derselben Achse befestigt ist und seinerseits wieder dem Stab U eine hin- und hergehende Bewegung in horizontaler Richtung ertheilt. Wenn der Stab U bei dieser seiner Bewegung nach rechts geht, so erhebt der gekrümmte Theil in der Mitte seiner Länge (s. Fig. 305) den unteren Stempel und mit ihm das geprägte Geldstück, welches sich auf ihm befindet, wodurch dieses über den oberen Rand des zerschnittenen Prägrings zu liegen kommt; zu gleicher Zeit wird durch denselben Stab der Zubringer Y gleichfalls nach rechts geführt. Derselbe schiebt die bereits geprägten Stücke vor sich her, bis sie in die Röhre C fallen, aus welcher sie in ein untergestelltes Gefäss gelangen; hierauf setzt er in die Mitte des Prägrings eine neue Münzplatte. Der Zubringer besteht hier, wie Fig. 306 zeigt, aus

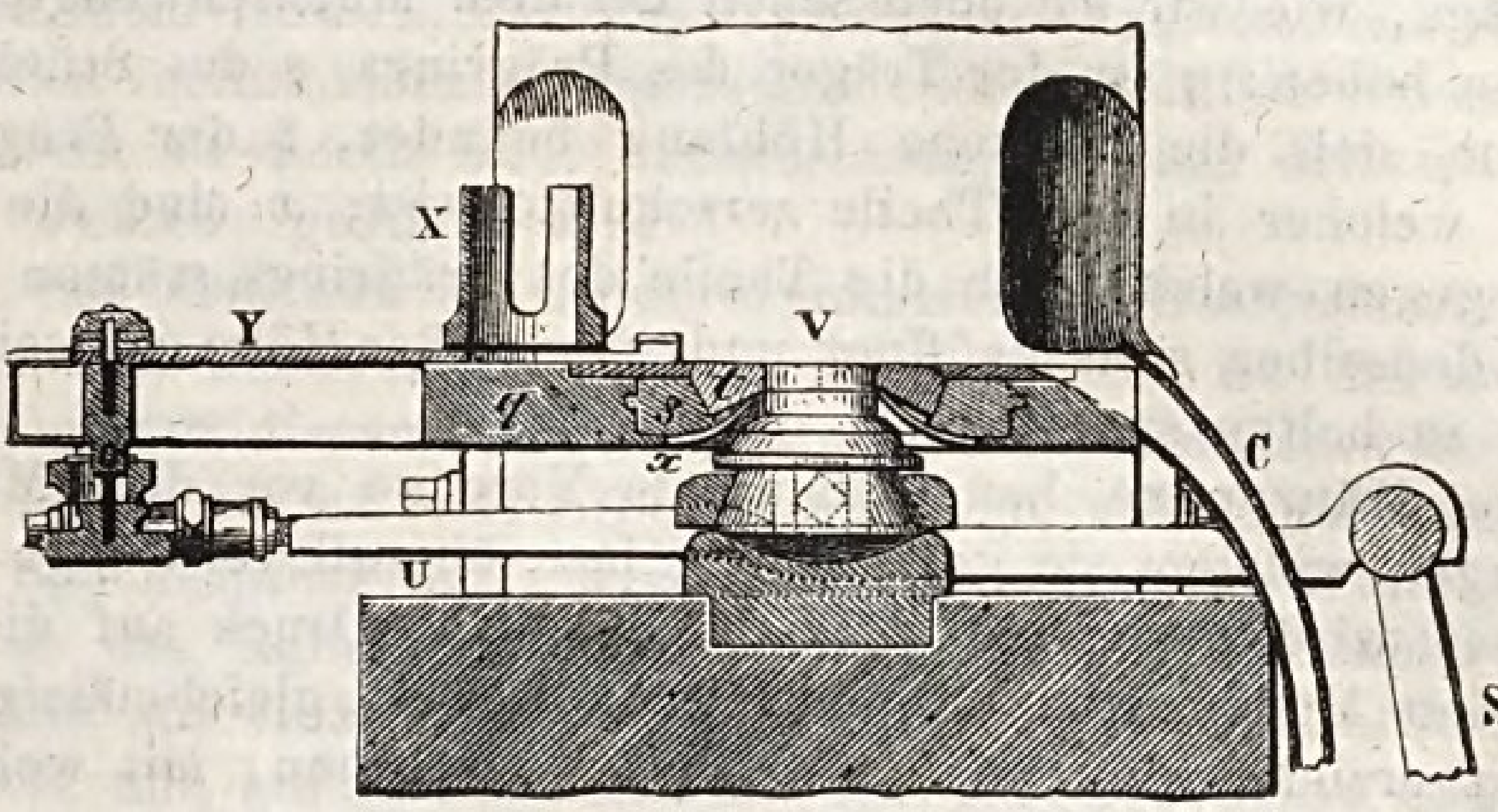


Fig. 305.

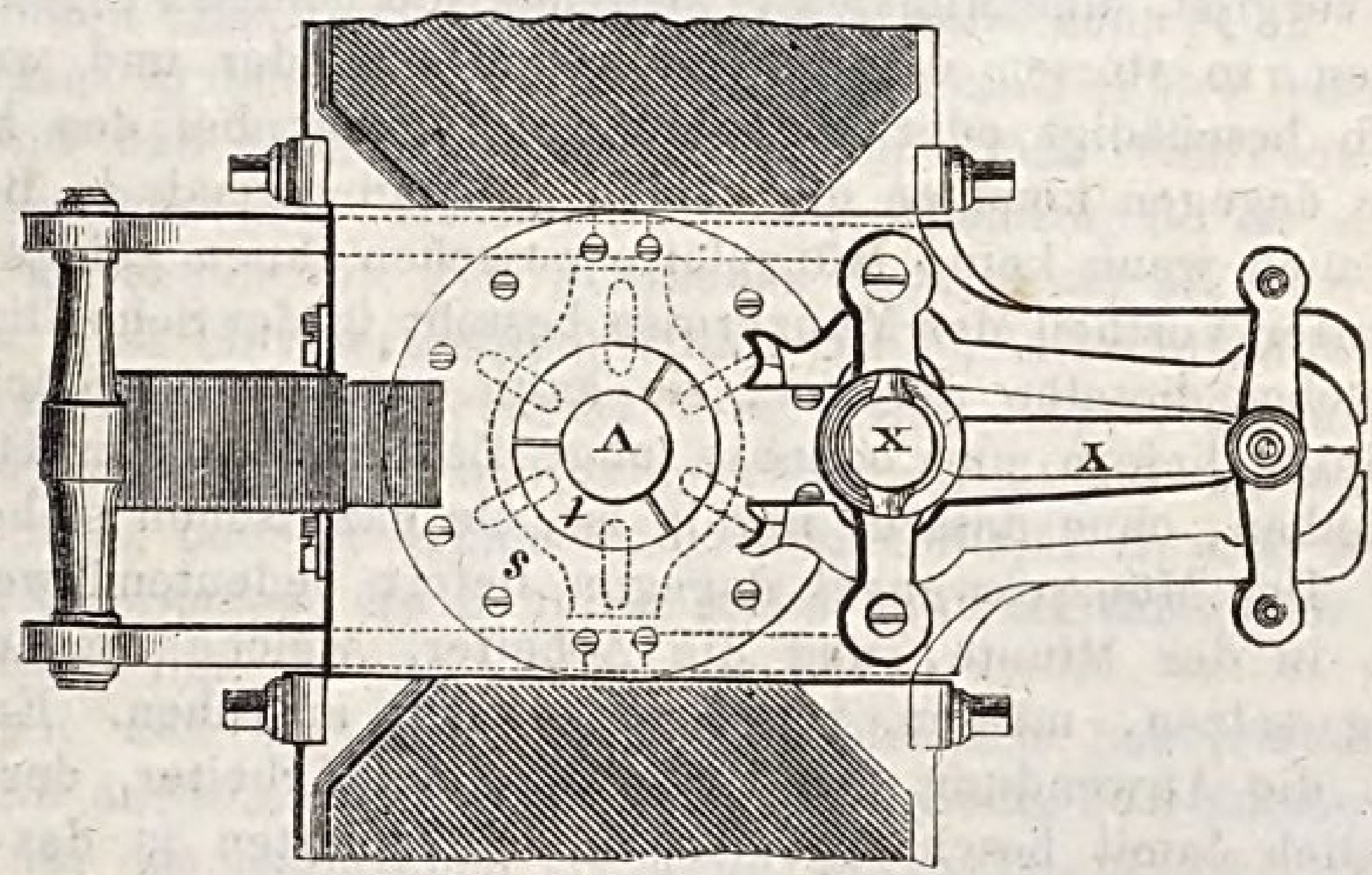


Fig. 306.

drei Theilen. Die beiden Seitenstücke nähern sich dem Mittelstück, um bei X die Münzplatte zu ergreifen, und indem hierauf der Zubringer nach rechts geht, stösst sein vorderster Theil das geprägte Stück in den Kanal, während sich der folgende gekrümmte Theil desselben, welcher die Münzplatte enthält, genau über den unteren Prägstempel legt. In dieser Stellung angekommen, entfernen sich die beiden Seitentheile wieder so weit von einander, dass bei dem nun folgenden Rückgang des Zubringers die Münzplatte in dem Prägring zurückbleibt. X ist eine Hülse, welche immer mit Münzplatten gefüllt erhalten wird; von diesen nimmt der Zubringer unten eine nach der anderen weg, um sie auf den unteren Prägstempel zu setzen. Die Figuren 305 und 306 zeigen auch die Einrichtung des zerschnittenen

Prägrings, wie wir sie oben schon bei dem Münzschwengel angegeben haben: *q* ist der Träger des Prägrings, *s* das Stück, in welchem sich die konische Höhlung befindet, *t* der Prägring selbst, welcher in drei Theile zerschnitten ist; *x* sind die Federn, gegen welche sich die Theile des Prägrings stützen und welche denselben stets geöffnet und in gleicher Höhe mit seinem Träger zu halten suchen.

Die Münzpresse hat bedeutende Vorzüge vor dem Münzschwengel, welchen sie gegenwärtig fast überall verdrängt hat. Zunächst wird durch sie stets der nämliche Druck auf die zu prägenden Münzplatten ausgeübt und also ein gleichmässigeres Produkt erzielt, während die Kraft des Menschen, mit welcher der Münzschwengel bewegt wird, sehr erheblichen Schwankungen unterworfen ist. Ferner, wenn man bei dem Münzschwengel einmal vergisst, eine Münzplatte zwischen die beiden Prägstempel zu legen, so stossen diese selbst gegen einander und werden dadurch beschädigt oder gar ganz zerbrochen; bei den Münzpressen dagegen kommen die beiden Stempel niemals in Berührung, auch wenn keine Münzplatte zwischen ihnen gelegen ist. Ein dritter Vortheil der Münzpresse besteht in der Schnelligkeit, mit welcher dieselbe arbeitet; sie kann ungefähr 60 Stücke in der Minute liefern und beliebig lange Zeit hindurch in Thätigkeit bleiben, ohne dass es nöthig ist, sie dazwischen stehen zu lassen. Der Münzschwengel dagegen liefert bedeutend weniger Stücke in der Minute, und die Arbeiter, welche ihn in Bewegung setzen, müssen von Zeit zu Zeit ausruhen. Endlich erspart die Anwendung der Hülse X einen Arbeiter, der ausschliesslich damit beschäftigt ist, die Münzplatten in das Loch des Zubringers zu legen.

§. 200. **Anfertigung der Geschützrohre; Geschütz- und Laufbohrmaschinen.** — Die zur Herstellung der Geschützrohre dienenden Maschinen bieten nicht blos für den Artilleristen, sondern für den Techniker überhaupt so viel Interessantes, dass wir uns hier, soweit es die Grenzen dieses Buches erlauben, etwas näher damit beschäftigen müssen. Wir legen den nachfolgenden Beschreibungen hauptsächlich die Maschinen der kgl. preussischen Geschützgiesserei in Spandau zu Grunde (s. *Wiebe's* Skizzenbuch, Heft IX, X, XV und XVI).

Die Geschützrohre werden nicht hohl, sondern massiv gegossen; vorne, wo später die Mündung hinkommt, ist der grosse sog. verlorene Kopf angegossen, zum Zwecke, ein Poröswerden des Gusses zu vermeiden. Ein zweiter Anguss ist am hintern

Ende, dem Boden, der sog. Spannzapfen, der bei den folgenden vorzunehmenden Operationen im Wesentlichen dazu dient, das Rohr an diesem Ende einzuspannen, und aus dem später die sog. Traube gebildet wird.

Von dem aus der Giesserei kommenden Geschützrohre wird vor allem der verlorene Kopf abgestochen. Zu diesem Ende wird es mit diesem Kopf mittelst Spannkloben an der Planscheibe der sog. Geschützdrehbank befestigt, während die Endfläche des Spannzapfens mit einem Körner versehen wird und auf der Spitze des Reitstocks läuft. Auf derselben Drehbank werden alsdann auf einem stehen gelassenen kleinen Stück des verlorenen Kopfes und auf dem Spannzapfen die Lagerstellen angedreht, mit denen das Rohr sowohl in die Lager dieser Drehbank selbst beim nachherigen Abdrehen als auch in die aller zur Bearbeitung dienenden Maschinen überhaupt ohne Spielraum passt. Es soll hierdurch erzielt werden, dass die Umdrehungen des Rohrs stets um eine und dieselbe Achse stattfinden. Zum Andrehen dieser Lagerstellen wird das Rohr mit dem Spannzapfen in einer an der Planscheibe mit vier Schrauben befestigten Muff so festgemacht, dass ein vierkantiger Ansatz des Zapfens mittelst 4 Klemmschrauben der Muff centrirt wird. Der Kopf läuft dabei im Mittelpunkt seiner Endfläche entweder direkt auf der Spitze des Reitstocks, oder er erhält bei grossen Geschützen eine Muff mit Centrirschrauben, die in ihrem Boden ein Stahlstück mit Körner eingesetzt hat.

Mit den auf diese Weise angedrehten Lagerstellen wird alsdann das Rohr in zwei Lagerböcke derselben Drehbank gelegt. Ein, auf das schon oben erwähnte vierkantige Stück des Spannzapfens aufgesteckter Mitnehmer bewirkt die Drehung des Rohrs von der Planscheibe aus. So vorbereitet wird nun das Geschütz so weit es seine Gestalt erlaubt abgedreht (Lagerfelder). Darnach werden auf derselben Drehbank auf der Stirnfläche der sog. Schildzapfen (um welche sich das Rohr, auf seiner Lafette liegend, drehen lässt) zwei auf einander senkrechte Linien gezogen: eine horizontale, parallel zur Rohrachse, und eine zweite vertikale in bestimmtem Abstand von der hinteren Kante der höchsten Bodenfriese. Die Durchschnittspunkte dieser beiden Linien auf jedem Schildzapfen bestimmen die gemeinschaftliche Achse derselben.

§. **201.** Von der Geschützdrehbank kommt das Rohr auf die Geschützhobelmaschine. Diese dient zur Bearbeitung der Stellen des Rohrs zwischen den Henkeln und Schildzapfen

und manchmal auch der ersteren selbst. Sie trägt zwei auf einem Bette verstellbare Lagerböcke, in welchen das Geschütz mit seinen Lagerstellen horizontal liegt. Der Meisel oder Stichel arbeitet in einem Support parallel oder in einem beliebig zu stellenden Winkel zur Rohrachse. Er schneidet nur beim Hingang. Beim Rückgang geht er leer und die dadurch entstehende Pause in der Arbeit des Meisels wird benützt, um die neue Spandicke einzustellen, indem man das Rohr um einen passenden Winkel dreht.

Zu bemerken ist noch, dass solche Geschütze, die von hinten geladen werden sollen, auf andere Weise als Geschütze mit geschlossenem Bodenstück auf der Maschine befestigt werden. Da bei denselben nämlich die Traube und somit die Lagerstelle hinter derselben fehlt, so wird das Bodenstück in einer gewöhnlichen Planscheibe, die statt der Muff mit der Spindel verbunden wird, befestigt, während die Lagerstelle am verlorenen Kopfe auch hier in einem Lagerbock läuft.

§. 202. Hiernach kommt das Geschütz zum Abdrehen der Schildzapfen auf die Schildzapfendrehbank. Das Bett dieser Maschine bildet ein Kreuz. Zwei gegenüberstehende Flügel dieses Kreuzes, das Langbett, tragen Lagerstühle, in welchen das Rohr mit seinen schon öfter genannten Lagerstellen horizontal liegt. Die anderen Flügel, das Querbett, tragen zwei Spindeldocken. In jenen Lagern muss das Geschütz so befestigt werden, dass sowohl die Seelenachse (Längenachse des Rohrs) als auch die Schildzapfenachse horizontal liegt, letztere besonders auch noch in gerader Linie mit den beiden Spindelachsen, was durch zwei, in den Spindeln vor- und zurückschiebbare Dorne mit Spitzen erreicht wird. Das Rohr bleibt in der eben beschriebenen Stellung fest eingespannt liegen, während die Drehstähle die drehende Bewegung von den Spindeln erhalten. Soll die Mantelfläche der Schildzapfen abgedreht werden, so muss der Drehstahl zugleich eine langsame Bewegung längs der Spindel- und Schildzapfenachse erhalten. Beim Abdrehen der Spiegelflächen der Schildzapfen dagegen muss er sich senkrecht zu jener Achse gegen diese hin bewegen. Durch Uebertragen mittelst Zahnräder und Schrauben werden beide letztere Bewegungen selbstthätig von der Maschine hervorgebracht.

§. 203. Das nun erfolgende Ausbohren des Rohres hat seine besonderen Schwierigkeiten, da es aus dem Massiven geschehen muss und das Bohrloch nicht ganz durchgeht, der Bohrer immer also nur einseitig unterstützt werden kann. Man hat desshalb schon verschiedenartige Modificationen der Bohrmaschinen

probirt; man hat bald Bohrmaschinen angewendet, wo das Rohr vertikal über oder unter dem Bohrer stand, bald solche mit horizontal liegendem Rohre. Die beim Bohren nothwendigen beiden Bewegungen, die drehende und die fortschreitende hat man bald dem Rohre allein gegeben, bald hat man sie in dieser oder jener Weise auf beide, Geschütz und Bohrer, vertheilt. In neuester Zeit hat man die horizontalen Bohrmaschinen, bei denen das Rohr eine blos drehende, der Bohrer eine blos fortschreitende Bewegung erhält, beibehalten.

Die Figuren 307 und 308 zeigen die Seitenansicht und den Grundriss einer von *Freund* in Berlin construirten Kanonenbohrmaschine der kgl. preuss. Geschützgiesserei in Spandau. Auf gutem Fundament ruhen die Spindeldocke A A und das Bett BB der Maschine, welche beide durch starke Schraubenbolzen verbunden sind. In der Spindeldocke bewegt sich in Bronzelagern die gusseiserne Spindel *a a*, deren hinteres Ende gegen die Spitze einer Stahlschraube *b b* läuft, die durch Mutter und Gegenmutter in einer gusseisernen Traverse TT befestigt ist. Diese Traverse selbst ist durch ein Gestänge mit den Widerlagern C C der sogleich zu besprechenden, den Bohrer verschiebenden Schrauben verbunden. Auf diese Weise werden der Druck des Bohrers auf die Spindel und der Gegendruck auf die Schraube so in Zusammenhang gebracht, dass sie lediglich auf Zerreissen des Gestänges wirken können. Dieses Gestänge besteht zunächst aus den beiden Parallelstücken *c c*, *d d*, welche die hintere Traverse mit dem Lager D D verbinden, und aus den beiden einander näher liegenden Parallelstücken *e e*, *f f*, welche letzteres Lager mit dem Kopfstück C C vereinigen und ihrer bedeutenden Länge halber an den beiden Rändern des Aufsatzes E E nochmals unterstützt werden.

Das auszubohrende Geschütz ruht mit der Lagerstelle des Spannzapfens in dem Lager D D, mit der des Kopfes in dem Lager F F. Diese Lager können durch Schrauben und Keile centrirt werden. Das Rohr wird mittelst eines, auf dem Vierkant des Spannzapfens steckenden Mitnehmers von der Planscheibe P P aus in Umdrehung versetzt.

Die an der Spindel befestigte Planscheibe trägt einen Zahnkranz mit 90 Zähnen, in welchen ein Getrieb *t* von 13 Zähnen auf der oberen Vorgelegswelle eingreift. Auf dieser Welle sitzt ein Rad *u* mit 36 Zähnen fest, während sich eine fünffache Stufenscheibe *v* (mit 18, 21, 24, 27 und 30 Zoll preuss. Durchmesser der Riemenrollen) mit dem daran befestigten Getriebe *w*

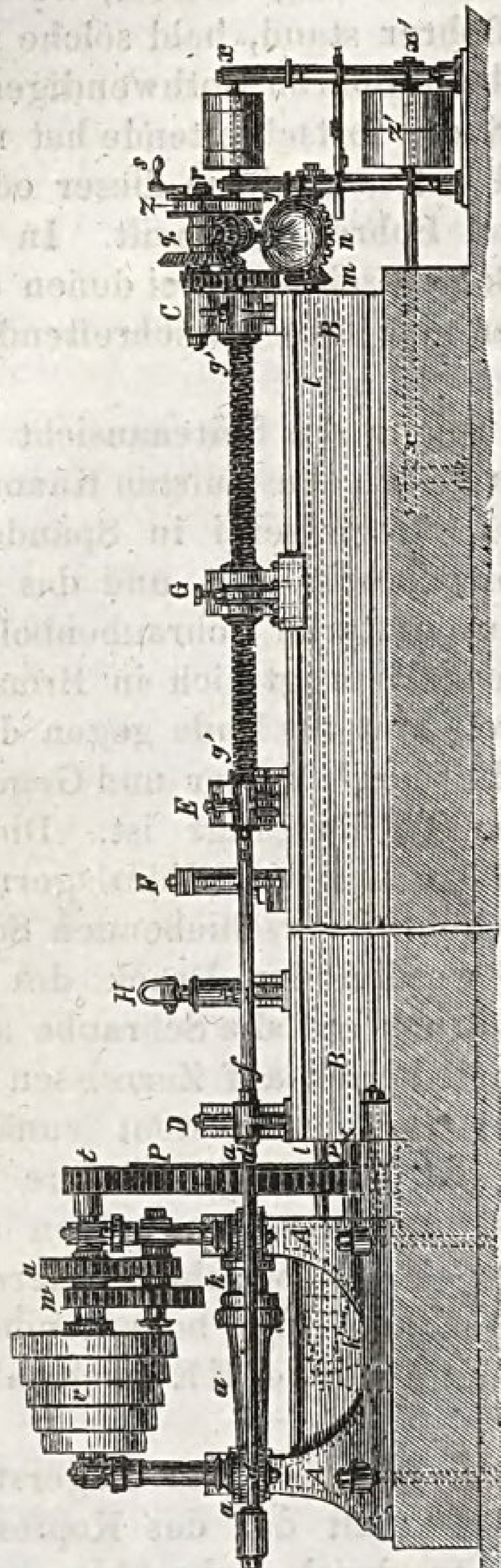


Fig. 307.

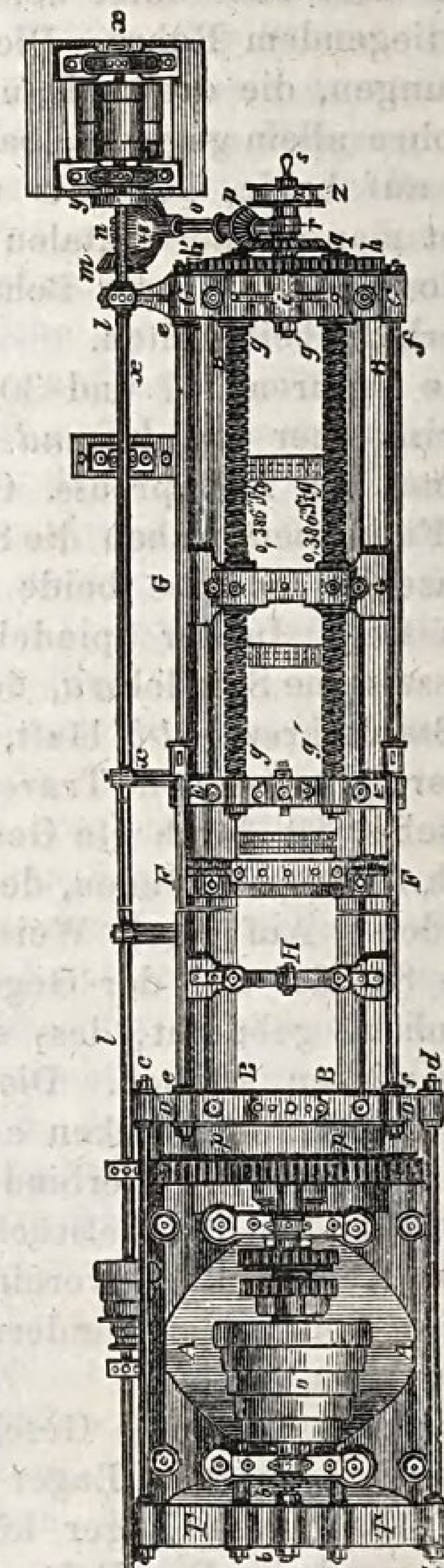


Fig. 308. (Maassstab: 1 : 72.)

von 16 Zähnen lose um diese Welle dreht. Unterhalb dieser Achse befindet sich ein zweites Vorgelege, bestehend aus zwei Rädern von 16 und 36 Zähnen, welche sich um einen festen Dorn drehen. An demselben können sie aber auch zur Seite geschoben und ausser Eingriff gebracht werden. Kuppelt man hiebei die Stufenscheibe mit ihrer Welle, so werden die Räder *u* und *t* direkt von ihr gedreht. Auf diese Weise kann man der

Spindel 10 verschiedene Geschwindigkeiten geben; von $1^1/_2$ Umdrehungen in der Minute bis zu 27.

Das hintere Ende der Bohrstange hat einen 4kantigen Kopf und ist in dem verschiebbaren Aufsatz G G so festgeklemmt, dass sich jene nicht drehen kann. Eine zweite Unterstützung findet die Bohrstange an ihrem vorderen Ende in dem Aufsatz E E, welcher an dem Bett durch Hakenschrauben festgeklemmt wird. Bei fortschreitender Arbeit liefert die sich bildende Seele des Rohres eine genügende Führung für die Bohrstange. Das Vorschieben der Bohrstange erfolgt durch zwei Schraubenspindeln $g\,g$, $g'\,g'$ von 0,386 Zoll preuss. Steigung, die einerseits in letzterwähntem Aufsatz EE, andererseits im Kopfstück C C so gelagert sind, dass sie sich zwar drehen, aber nicht der Länge nach verschieben können. Sie werden von Muttern umfasst, die in dem verschiebbaren Support G G befestigt sind. Beide Schrauben drehen sich stets miteinander und verschieben so den Support je nach dem Sinne ihrer Drehung vor- oder rückwärts. Diese gleichzeitige Drehung beider Schraubenspindeln wird durch die beiden Zahnräder h, h' von je 56 Zähnen vermittelt, die an ihren, durch das Kopfstück C C gehenden Enden sitzen und durch das in beide zugleich eingreifende Trieb i mit 14 Zähnen herumgedreht werden. Die Drehung dieses Triebs und damit der Vorschub des Bohrers wird während der eigentlichen Bohrarbeit selbstthätig von der Maschine besorgt. Zu diesem Behuf ist auf der Spindel selbst eine dreifache Stufenscheibe k von 8, 10 und 12 Zoll pr. Durchmesser der Rollen angedreht, die mit einer zweiten Stufenscheibe k' mit denselben Durchmessern auf der Welle $l\,l$ correspondirt. Letztere Welle trägt an ihrem entgegengesetzten Ende ein kleines konisches Rad m von 24 Zähnen, das mit einem n von 48 Zähnen an der schmiedeisernen Welle o im Eingriffe steht. Diese Welle endlich treibt durch Vermittlung zweier konischer Räder p, q mit 24 und 56 Zähnen die Welle r, auf welcher das Trieb i sitzt. Aus vorstehenden Angaben berechnet sich leicht, dass in Folge der drei Stufenscheiben der Bohrer für jede Umdrehung der Spindel nur bez. 0,03102 oder 0,02068 oder 0,01378 Zoll preuss. vorrückt.

Soll der Bohrer schnell aus dem Rohre herausgezogen werden, so lässt man das konische Rädchen m auf der Welle $l\,l$ durch Herausziehen des Keils lose laufen und versetzt die Welle r mit der Kurbel s direkt in Drehung. Wenn letztere Bewegung aber durch die Maschine bewerkstelligt werden soll, so legt man, je nachdem der Bohrer herauszuziehen oder einzu-

bringen ist, einen offenen oder gekreuzten Riemen auf die mittlere feste Rolle (mit 10 Zoll preuss. Durchm.) der Welle xx, wodurch die Rolle y mit gleichfalls 10 Zoll Durchm. und die z von der nämlichen Grösse und damit die Welle r und das Trieb i gedreht werden. Obiger Riemen erhält seine Bewegung von der Welle $x'x'$, die eine Rolle z' von 16 Zoll Durchmesser trägt und an dem vorderen, in der Figur abgebrochenen Ende eine feste und lose Riemscheibe, die von der Hauptbetriebswelle aus in Umdrehung gesetzt wird.

Das Bohren geschieht in zwei auf einander folgenden Operationen: Vorbohren (Schroppen) und Nachbohren (Schlichten) genannt. Durch das Vorbohren mit dem Vor-, Schropp- oder Massivbohrer wird eine Seele gebildet, deren Durchmesser 0,02 — 0,04 Zoll preuss. geringer ist als der normale Seelendurchmesser. Den geringen Span von 0,01 — 0,02 Zoll Dicke nimmt der Nachbohrer fort und stellt so ein Bohrloch von bestimmtem Durchmesser und grosser Gleichförmigkeit her.

Die Gestalt der Bohrer richtet sich natürlich nach der Form, welche die Seele erhalten soll. Die Figuren 309 bis 311 stellen einen Vorbohrer neuester Construktion für durchaus cylindrische Seelen vor, wie sie bei 6-, 12- und 24pfünder Kanonen vorkommen. Die Figuren sind in $^1/_8$ natürlicher Grösse gezeichnet und der dargestellte Bohrer dient in dieser Grösse für Zwölfpfünder. Die Figuren 309 und 310 sind Ansichten von entgegengesetzter Seite her, die Fig. 311 ist ein Durchschnitt

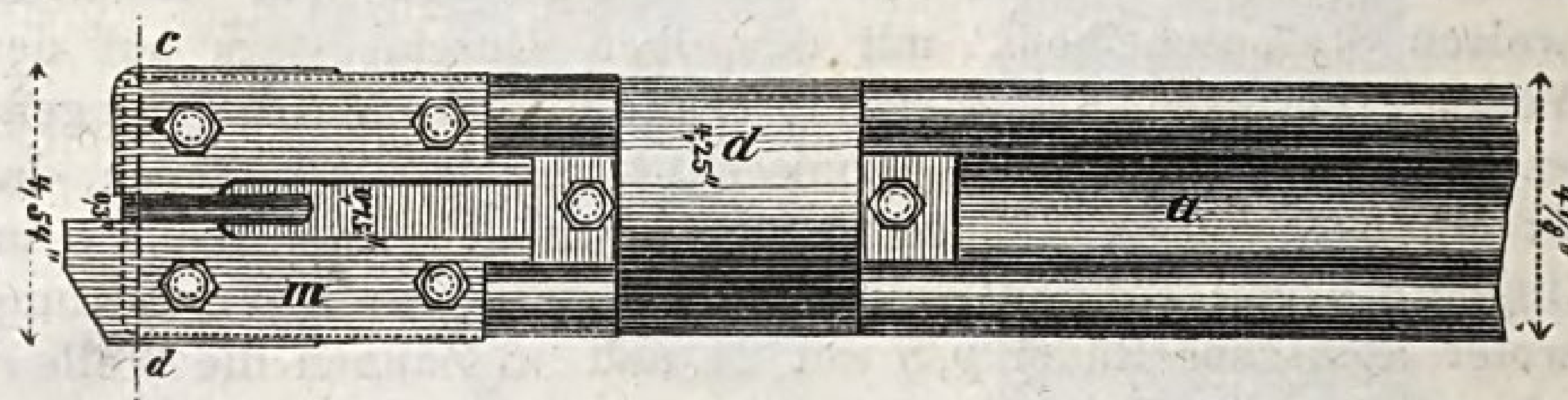


Fig. 309.

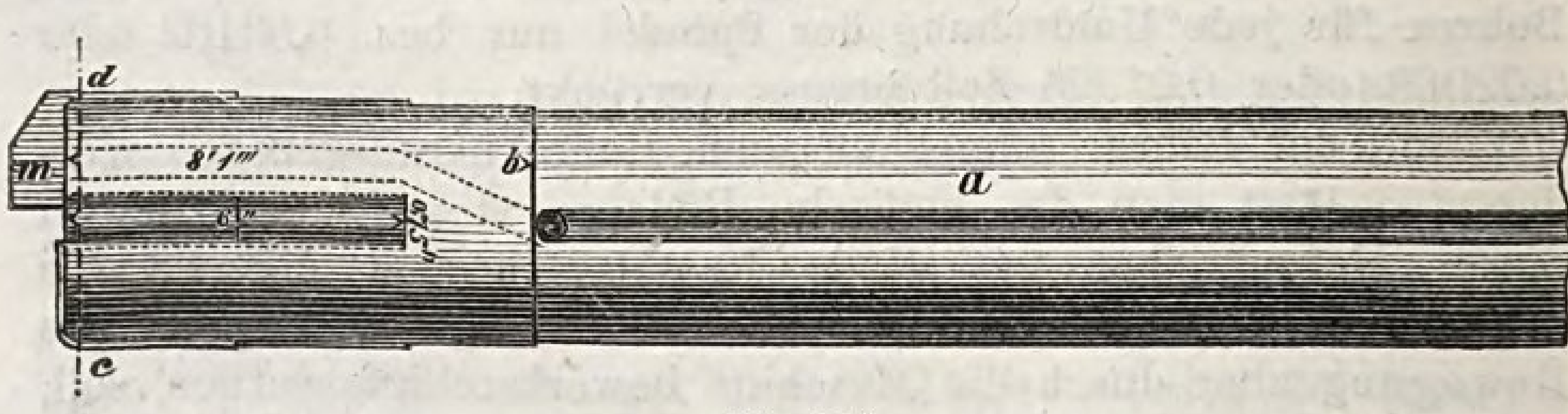
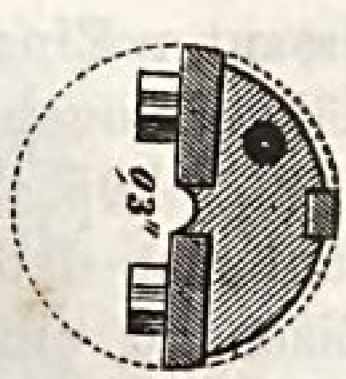


Fig. 310.


Fig. 311.

nach der Linie *cd* in jenen Figuren. Die gusseiserne Bohrstange *a* ist mit dem Bohrkopf *b* und dem Spannzapfen *c* aus einem Stück. Sie ist, um den Bohrspänen einen freien Abzug zu gestatten, mit einer tiefen Hohlkehle versehen. Das Futter *d* wird auf der Bohrstange durch zwei Schrauben nur dann befestigt, wenn dieselbe oder wenn die Messer abgedreht werden sollen, wobei dann die Bohrstange mit diesen so gebildeten Zapfen in dem Brillenfutter einer Drehbank läuft. Bei der Bohrarbeit selbst ist das Futter *d* entfernt. Der Bohrkopf hat ein Messer *m* und zwei Führungsschienen (Gegenhalter). Bei der fortschreitenden Bohrarbeit lässt das Messer in der Seelenachse einen cylindrischen Zapfen von 0,3 Zoll Durchmesser stehen, der, sobald er eine gewisse Länge erreicht hat, durch die spiralförmig auslaufende Nuth abgebrochen und mit den Spänen entfernt wird.

Bevor der Bohrer beim *Beginn der Arbeit* wirken kann, muss der Anfang des Bohrlochs ausgedreht werden. Hiezu dient ein einfacher Support, der auf der Bohrmaschine angebracht wird. Mit Hilfe desselben Supports, dessen Stichel zwei auf einander senkrechte Bewegungen in horizontaler Ebene erhalten kann, werden nach Beendigung der Bohrarbeit die Lagerstellen abgestochen, die Mündungsfläche berichtigt, die Mündung abgekantet und der Traube ihre Form gegeben. Hiezu wird ein Lager H (Fig. 307 und 308) mit Holzfutter eingeschaltet, in welchem sich das Rohr hinter dem Kopfe nahe an dem Rundstäbchen oder der *Mundfriese* genau centrisch dreht. Die Traube wird aus dem Zapfenstück gebildet und der noch stehen bleibende dünne Zapfen später abgeschnitten.

§. 204. Nachdem alle diese Operationen auf der Bohrmaschine vollendet sind, werden an dem Rohre noch einige Handarbeiten mit der Feile an Henkeln und Schildzapfenscheiben ausgeführt und das Rohr der ersten Revision in Bezug auf richtige Lage aller Rohrtheile unterworfen. Hierauf erfolgt das *Verschrauben* desselben, unter welcher Bezeichnung man das Einschrauben des kupfernen Zündlochstollens versteht. Dann werden die Richtvorrichtungen, der *Aufsatz* und das *Korn*, angebracht. Alle diese Operationen geschehen auf der sog. *Geschütz-Verschraubmaschine*, mit welcher endlich auch das Bohren des in einem Ansatz der Traube befindlichen Loches der Bombenkanonen bewerkstelligt wird. Diese Maschine ist hiernach im Wesentlichen eine Bohrmaschine, welche mit gewissen, inter-

essanten Einzelheiten ausgerüstet ist, auf die wir aber hier nicht näher eingehen können.

§. 205. Die Läufe der Gewehre werden aus dem Rohen zunächst dadurch hergestellt, dass man ein passendes Stück Eisen zu einem Rohre zusammenrollt und die Endkanten über einen Dorn schweisst. Dies geschieht durch sehr rasch auf einander folgende Schläge eines verhältnissmässig kleinen Hammers, und werden immer nur Stellen von 1—2 Zoll Länge auf einmal geschweisst.

Das Ausbohren des Laufs geschieht auf den sog. Laufbohrmaschinen oder Flintenbohrbänken, die von einfacher Construktion sind. Der Bohrer hat die Gestalt einer etwa $1^1/_2$ Fuss langen vierkantigen Reibahle mit rundem Stiel, die in dem sog. Bohrkopf befestigt wird. Derselbe erhält eine sehr grosse Umdrehungsgeschwindigkeit, bis zu 180 Umdrehungen in der Minute. Es werden 6 bis 8, sogar 10 Bohrer von stufenweise zunehmender Dicke nach einander angewendet. Der Lauf ist dabei, horizontal liegend, in seiner Mitte eingespannt und zwar auf einem Schlitten und so, dass er sich sowohl um eine horizontale als um eine vertikale Achse etwas drehen und so den Vibrationen des Bohrers nachgeben kann. Jener Schlitten wird mittelst eines Hebels durch einen Arbeiter gegen den Bohrer vorgeschoben oder in neuester Zeit (in der kgl. bayer. Gewehrfabrik in Amberg) selbstthätig durch die Maschine mittelst einer Leitschraube.

Das Ziehen der Läufe ist ebenfalls sehr einfach. Der Lauf ist dabei an seinen beiden Enden fest eingespannt und bleibt liegen. Der Ziehkolben ist in den Fig. 312 und 313 im Längenschnitt und Grundriss abgebildet. Die Nase *g* ist mittelst der Schraube *n* und des Keils *i* verstellbar. Das Instrument wird an der in einem Support eingespannten Stange *t* durch das Rohr in der Richtung des Pfeiles gezogen, wobei die Nase *g* eine Nuth einhobelt. Um dieser die erforderliche Windung (Drall) zu geben, wird der Kopf, in welchem die Stange *t* befestigt ist, in dem Support mit dem Fortschreiten desselben zugleich gedreht. Dies kann auf zweierlei Arten geschehen. Entweder sitzt an jenem Kopf ein Zahnrad, in welches eine Zahnstange eingreift, die, vertikal stehend, mit ihrem untern Ende in Folge des Ziehens eine schiefe Ebene hinaufgleitet und dadurch das Zahnrad langsam dreht; durch Veränderung der Steigung dieser schiefen Ebene kann der Drall eine beliebige Grösse erhalten. Oder es besitzt der hintere Theil der Stange *t*

eine oder mehrere Nasen, die in den bereits fertigen Zügen eines Modelllaufs gleiten und dadurch eine entsprechende Drehung des Ziehkolbens veranlassen. — Nachdem ein Zug fertig ist, muss der Ziehkolben um einen der Anzahl der zu gebenden Züge entsprechenden Winkel gedreht werden, um einen neuen Zug einzuhobeln.

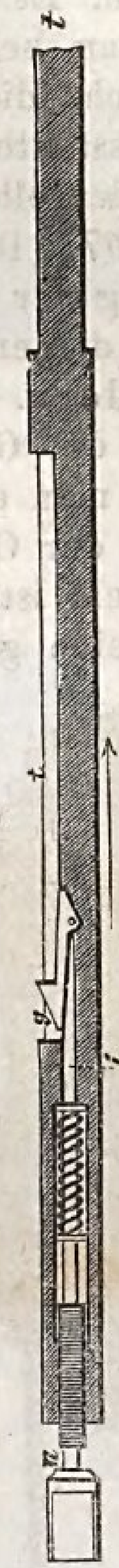


Fig. 312.

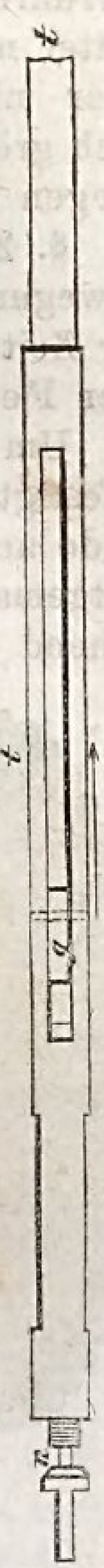


Fig. 313.

§. 206. **Die Uhren.** — Bei der gleichförmigen Bewegung ist, wie wir wissen, der Weg, welcher in irgend einer Zeit durchlaufen wird, dieser Zeit proportional; eine solche Bewegung ist daher in hohem Grade geeignet, als Mittel zum Messen der Zeit angewendet zu werden, da sie dieses Geschäft auf das Messen des Raumes zurückführt, den der sich bewegende Körper durchläuft. Man war desshalb bei der Construktion derjenigen Instrumente, welche als Zeitmesser dienen sollen, darauf bedacht, eine gleichförmige Bewegung herzustellen; aber einiges Nachdenken zeigt leicht, dass dies ausserordentlich schwer zu erreichen ist. Damit sich eine Maschine stets mit der nämlichen Geschwindigkeit bewegt, müssen die an ihr wirkenden Kräfte den Widerständen fortwährend das Gleichgewicht halten; wenn die Widerstände immer die nämliche Grösse behalten, so müssen auch die Kräfte fortwährend mit der nämlichen Stärke wirken; und wenn die Widerstände veränderlich sind, so müssen sich auch die Kräfte in dem nämlichen Sinne und um eine solche genau bestimmte Grösse ändern, dass fortwährend Gleichgewicht besteht. Nun ist klar, dass man sehr bedeutenden Schwierigkeiten begegnen muss, wenn man bei der grossen Zahl von Widerständen aller Art, welche sich bei der Bewegung einer Maschine entwickeln, die Kraft so einrichten will, dass sie in jedem Augenblick diesen Widerständen das Gleichgewicht hält; und man wird dies noch besser einsehen, wenn man bedenkt, dass die Widerstände meistens rein zufälligen Aenderungen unterworfen sind, die von äusseren Ursachen, wie von Temperaturwechsel, Aenderungen des Feuchtigkeitszustandes der Luft u. s. w.

herrühren. Es soll unsere Aufgabe sein, zu zeigen, durch welche Mittel man bei der Construktion der Uhren dazu gelangt ist, zwar nicht diese Schwierigkeiten völlig zu heben, aber sie doch grösstentheils geschickt abzuwenden, oder auch auf anderen Wegen denselben Zweck zu erreichen.

§. 207. Die Motoren, welche angewendet werden, um die Bewegung der Mechanismen hervorzubringen, die zum Messen der Zeit dienen, theilen sich in zwei Arten: es sind Gewichte oder Federn.

Um ein Gewicht als Motor einer Uhr wirken zu lassen, befestigt man es an das eine Ende einer Schnur, deren anderes Ende an der Oberfläche eines horizontalen Cylinders (Fig. 314) festgemacht ist, und welche von diesem Befestigungspunkt ausgehend eine gewisse Anzahl von Windungen um den Cylinder macht. Der Cylinder kann sich um seine Achse drehen; das Gewicht, welches fortwährend abwärts zu gehen sucht, theilt ihm daher eine Rotationsbewegung mit, die auf den übrigen Mechanismus durch ein Zahnrad übertragen wird, welches an dem Cylinder befestigt ist.

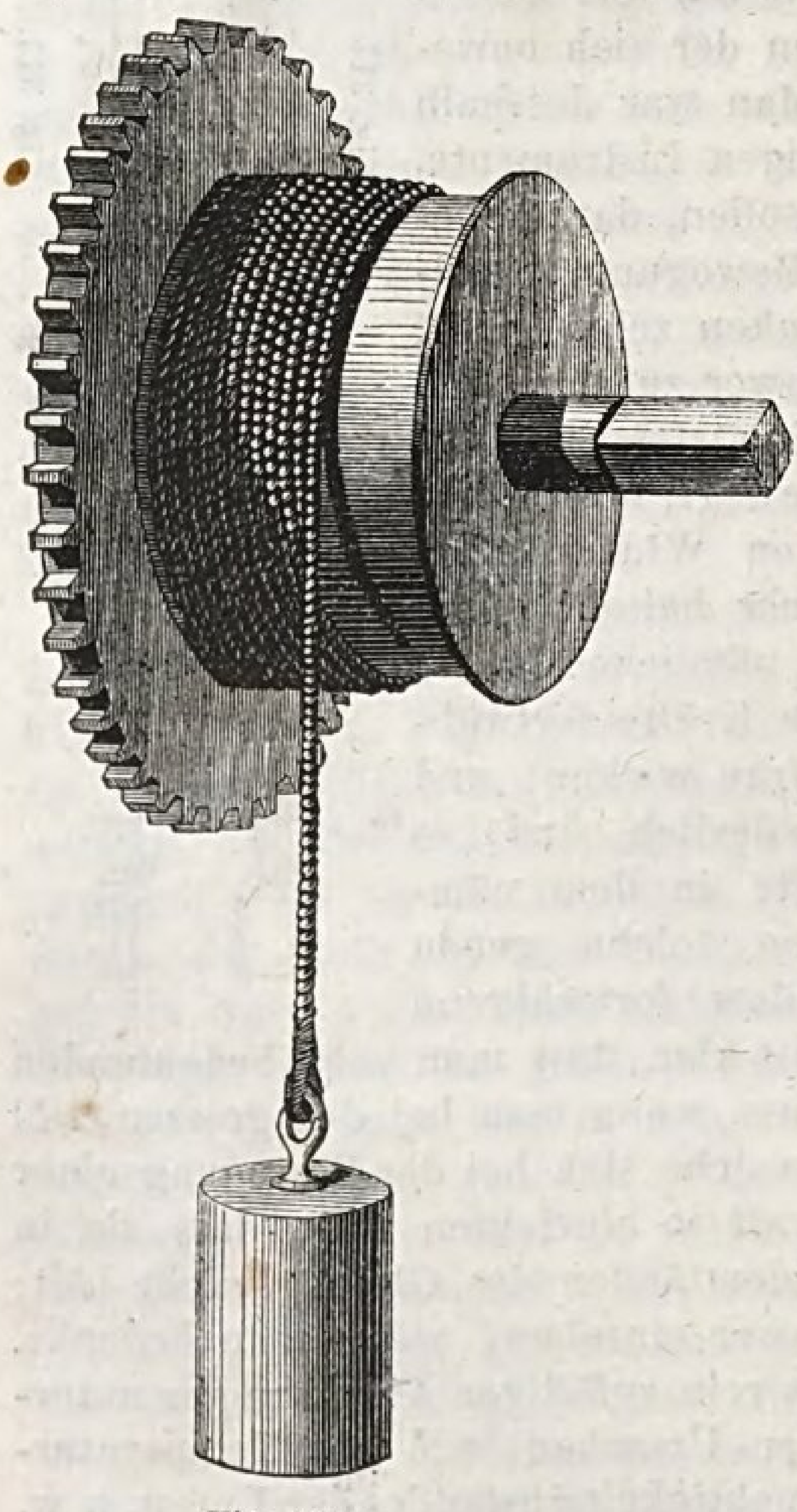


Fig. 314.

Die Federn, welche man als Motoren für Uhrwerke anwendet, sind dünnne und sehr lange Bänder von Stahl, welche so gearbeitet sind, dass sie sich von selbst spiralförmig aufrollen, wie es Fig. 315 zeigt. Denken wir uns, dass das äussere Ende einer solchen Spirale mit einem festen Punkt in Verbindung steht, während das innere Ende derselben an einer Achse befestigt ist, die sich um sich selbst drehen kann; wenn man dann diese Achse in passendem Sinne dreht, so wird sie das

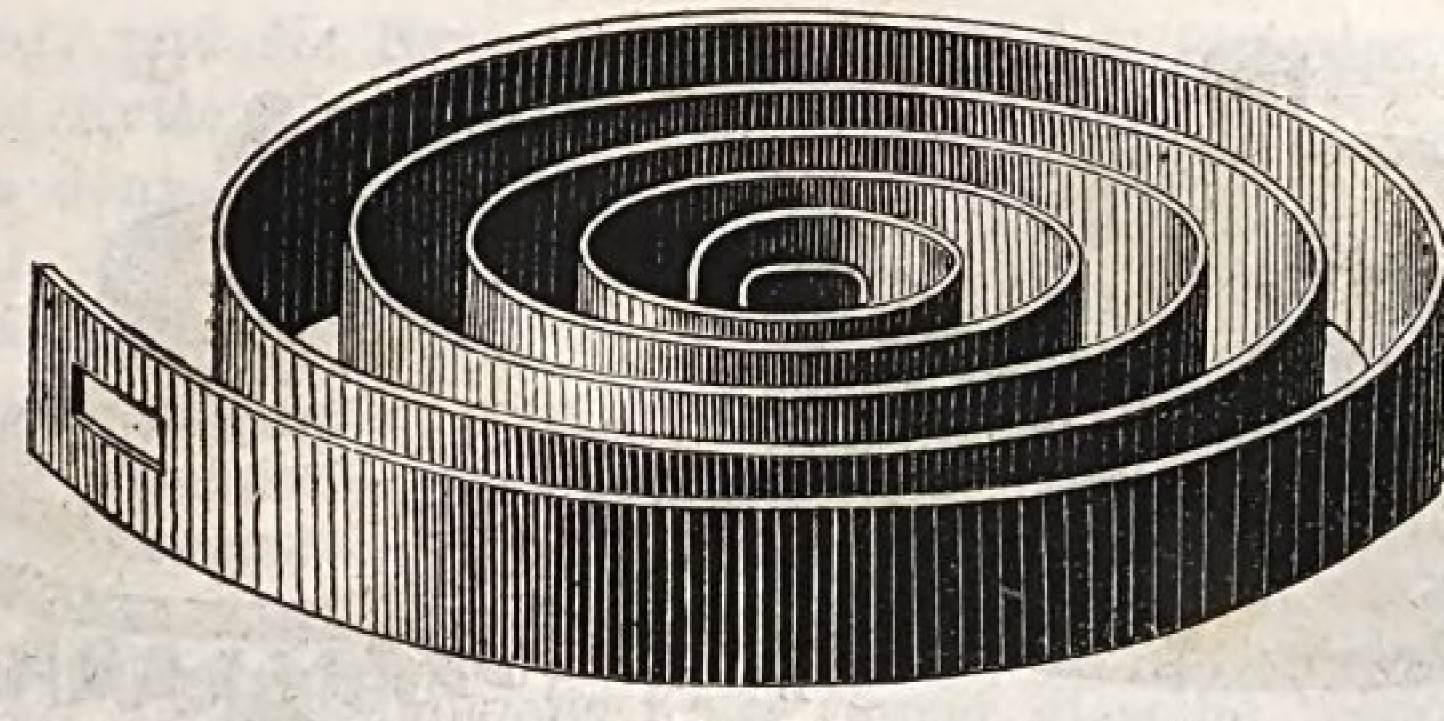


Fig. 315.

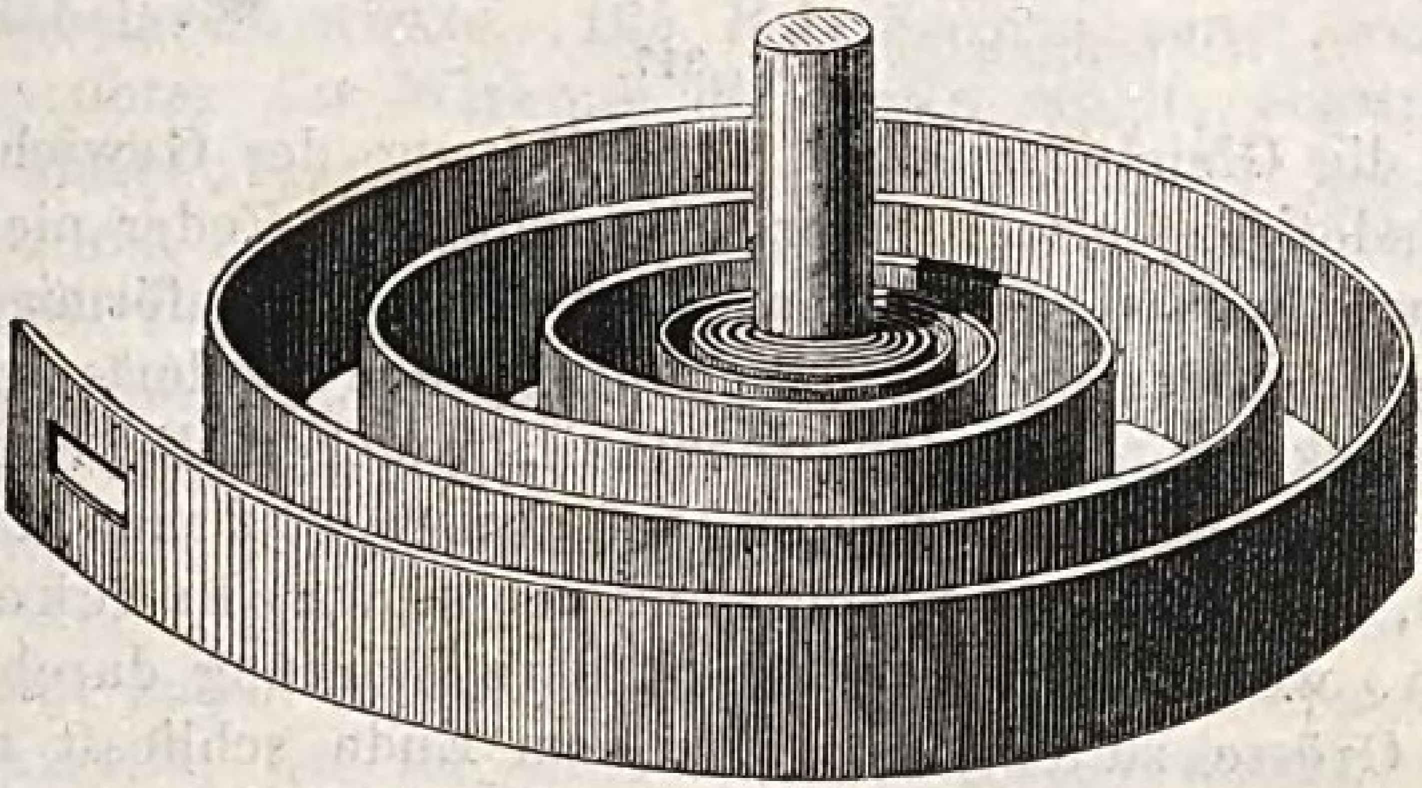


Fig. 316

innere Ende der Feder mit fortnehmen, die Spiralgänge derselben werden sich mehr und mehr auf den Umfang der Achse aufwickeln, und die Feder wird die Gestalt annehmen, wie sie Fig. 316 zeigt. Sobald aber die Achse wieder sich selbst überlassen wird, so ertheilt ihr die Feder, welche ihre ursprüngliche Gestalt wieder anzunehmen sucht, eine Rotationsbewegung in entgegengesetzter Richtung. Es ist klar, dass auch das innere Ende der Feder mit einem festen Punkt verbunden und das äussere Ende an einem Stück befestigt sein kann, das sich um die Achse der Feder dreht. Dieses Stück wird in Folge der Wirkung der Feder gleichfalls eine Rotationsbewegung um seine Achse erhalten.

Wenn man die Wirkung der Feder, von der wir eben gesprochen haben, mit der Wirkung eines Gewichts vergleicht, so wird man finden, dass zwischen beiden ein wesentlicher Unterschied besteht. Das Gewicht wirkt fortwährend mit der nämlichen Stärke, während die Kraft der Feder von dem Moment an, wo sie zu wirken beginnt, bis zu dem Moment, wo sie ihre ursprüngliche Form wieder annimmt, fortwährend abnimmt. Der Vortheil,

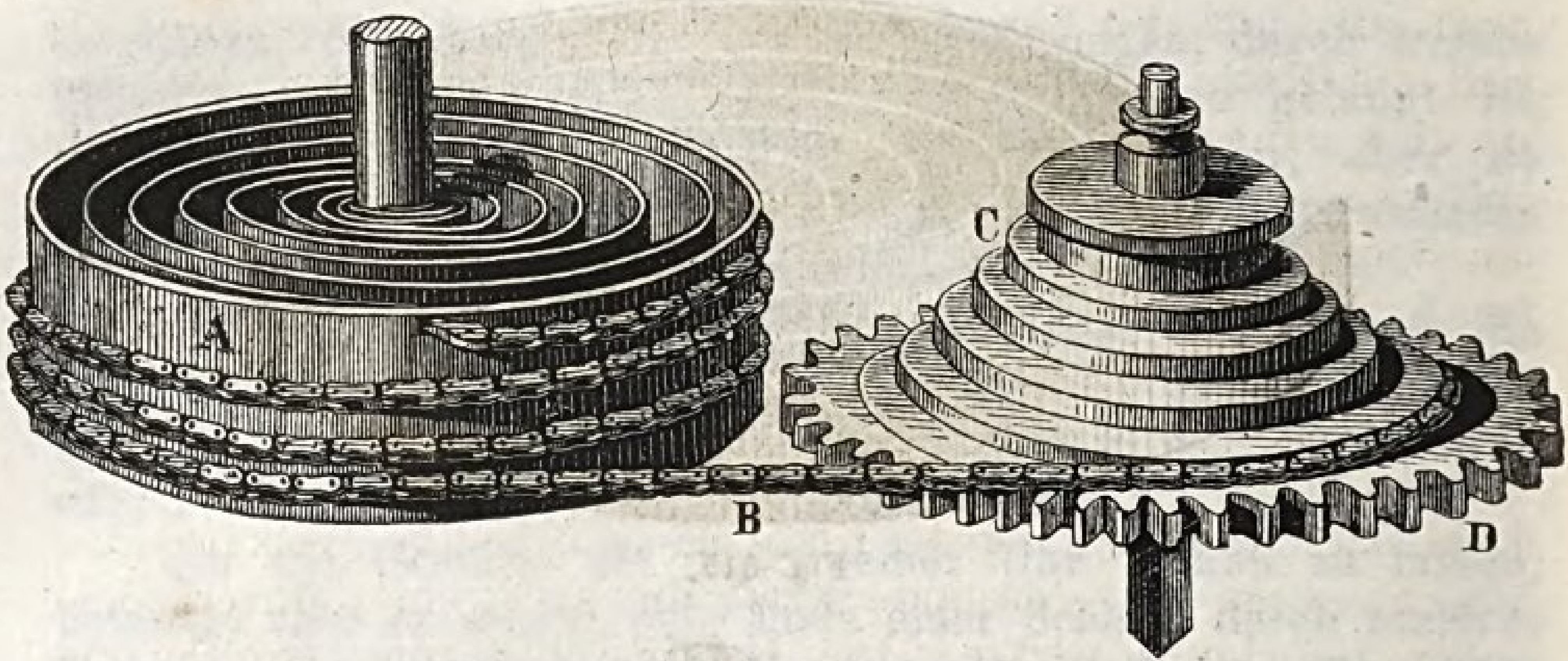


Fig. 317.

welchen die Gleichförmigkeit der Wirkung des Gewichtes darbietet, findet sich also bei der Anwendung der Feder nicht mehr wieder, und wir werden sehen, dass diese Gleichförmigkeit der Wirkung eine wesentliche Bedingung für den regelmässigen Gang des Uhrwerks ist. Um den Nachtheil, welchen die Federn aus diesem Gesichtspunkt darbieten, aufzuheben, hat man das Mittel ersonnen, sie erst durch Vermittlung der sog. Schnecke wirken zu lassen, welche den Zweck hat, ihre Wirkung durchweg auf gleicher Grösse zu erhalten. Zu dem Ende schliesst man die Feder in einen hohlen Cylinder A (Fig. 317) ein, welcher das Federhaus genannt wird. Auf der äussern Oberfläche dieses Federhauses ist das eine Ende einer fein gegliederten Kette B befestigt, welche sich, nachdem sie eine gewisse Zahl von Windungen um diese Oberfläche gemacht hat, um eine Trommel C von eigenthümlicher Gestalt schlingt, an welcher ihr zweites Ende befestigt ist. Diese Trommel führt den Namen Schnecke; sie besitzt, wie die Figur zeigt, Gänge, die in schraubenförmigen Windungen treppenförmig übereinander liegen, und auf welche sich die Kette B aufwickelt. Wenn die Feder vollständig gespannt ist, so ist die Kette auf die ganze Oberfläche der Schnecke vollständig aufgerollt; sie entfernt sich von derselben auf Seite der kleineren Basis, um auf das Federhaus überzugehen, wo sie sich endigt, nachdem sie die Oberfläche desselben in einer kurzen Strecke berührt hat. Von der Feder ist das innere Ende mit einem festen Punkt verbunden, während das äussere Ende an dem Umfang des Federhauses festgemacht ist; indem sich folglich die Feder abspannt, dreht sie das Federhaus, dessen Bewegung durch Vermittlung der Kette der Schnecke mitgetheilt wird. Dadurch wickelt sich die Kette von der Schnecke ab und auf das Feder-

haus auf, und die Bewegung dauert offenbar so lange fort, bis sich die Kette gänzlich von der Schnecke abgewickelt hat, wo sie sich dann auf Seite der grösseren Basis von dieser letzteren entfernt. Während sich daher die Kraft der Feder und mit ihr die Spannung der Kette, welche durch sie hervorgebracht wird, im Verlauf der Bewegung fortwährend vermindert, wirkt sie dagegen auf die Schnecke am Ende eines immer grösseren Hebelarmes, und man begreift leicht, dass man die Form der Schnecke so bestimmen kann, dass eine genaue Compensation stattfindet, d. h. dass die Spannung der Kette immer dieselbe Wirkung ausübt, als wenn eine constante Kraft am Ende eines unveränderlichen Hebelarms wirkte. Die Rotationsbewegung, welche die Schnecke unter der Wirkung der Kette erhält, überträgt sich auf den übrigen Mechanismus durch Vermittlung des Zahnrads D, welches durch die Schnecke mit herumgedreht wird.

§. 208. Der Motor einer Uhr, von welcher Art er auch sei, ein Gewicht oder eine Feder, dreht, wie wir gesehen haben, eine Welle; ein Zahnrad, welches sich mit dieser Welle dreht, greift in ein anderes, kleineres Zahnrad oder in ein Trieb, das an einer zweiten Welle, parallel zur ersten, befestigt ist. Diese zweite Welle trägt ausserdem noch ein Zahnrad, welches wieder in ein Trieb eingreift, das an einer dritten Achse, welche dieselbe Richtung wie die vorhergehenden hat, befestigt ist, u. s. f. Wenn das Rad, welches an der ersten Achse sitzt, sechsmal so viel Zähne hat, als das Trieb, in welches es eingreift, so dreht sich die zweite Achse sechsmal so schnell als die erste; wenn ferner das Zahnrad an der zweiten Achse viermal so viel Zähne hat, als das zugehörige Trieb, so dreht sich die dritte Achse viermal so schnell als die zweite und folglich 24mal so schnell als die erste. In dieser Weise fortfahrend erkennt man, dass sich die Rotationsbewegung der ersten Welle mit immer grösserer Geschwindigkeit auf die zweite, dritte, vierte Welle überträgt, und dass das Verhältniss der Geschwindigkeiten zweier aufeinander folgender Achsen stets dem Verhältniss der Zähnezahlen des Rades und des Triebes gleich ist, welche die Bewegung von der einen auf die andere übertragen.

§. 209. Nachdem wir nun die Kraft, durch welche ein Uhrwerk in Bewegung gesetzt wird, sowie im Allgemeinen die Anordnung des Räderwerks in demselben kennen gelernt haben, bleibt uns noch übrig, zu zeigen, wie man diese Bewegung so regulirt, dass ein oder mehrere Zeiger, die sich über einem Zifferblatt befinden, eine gleichförmige Bewegung über dasselbe machen.

Wir haben oben bereits gesagt, dass, um eine gleichförmige Bewegung zu erhalten, fortwährend Gleichgewicht zwischen der bewegenden Kraft und den gesammten Widerständen hergestellt werden muss. Man kann dies erreichen, indem man an der letzten Achse des Mechanismus, derjenigen also, deren Geschwindigkeit am grössten ist, Flügel anbringt, welche während ihrer Bewegung die Luft vor sich herstossen müssen. Fig. 318 zeigt die Einrichtung, welche man den Flügeln gibt; sie sind, zwei an der Zahl, einander gewöhnlich direkt entgegengesetzt und bilden einfach eine dünne rechteckige Blechtafel A, welche in der Mitte ihrer Breite von einer Achse durchsetzt wird, mit welcher sie sich herumdrehen muss. Der Widerstand, welchen die Luft dieser Bewegung entgegensetzt, ändert sich proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit derselben (§. 170). Daraus folgt, dass am Beginn der Bewegung der Widerstand, welchen diese Flügel erfahren, noch sehr gering ist; die Kraft des Motors ist zu gross, als dass Gleichgewicht bestehen könnte, und die Geschwindigkeit nimmt daher zu. Diese Beschleunigung der Bewegung hat aber zugleich eine Vergrösserung des Widerstandes, welchen die Flügel erfahren, zur Folge, und die Maschine erreicht bald eine solche Geschwindigkeit, dass die Kraft den Widerständen gerade noch das Gleichgewicht hält. Von da ab ändert sich die Geschwindigkeit der Bewegung nicht mehr; diese bleibt also gleichförmig, so lange die Kraft die nämliche Stärke behält.

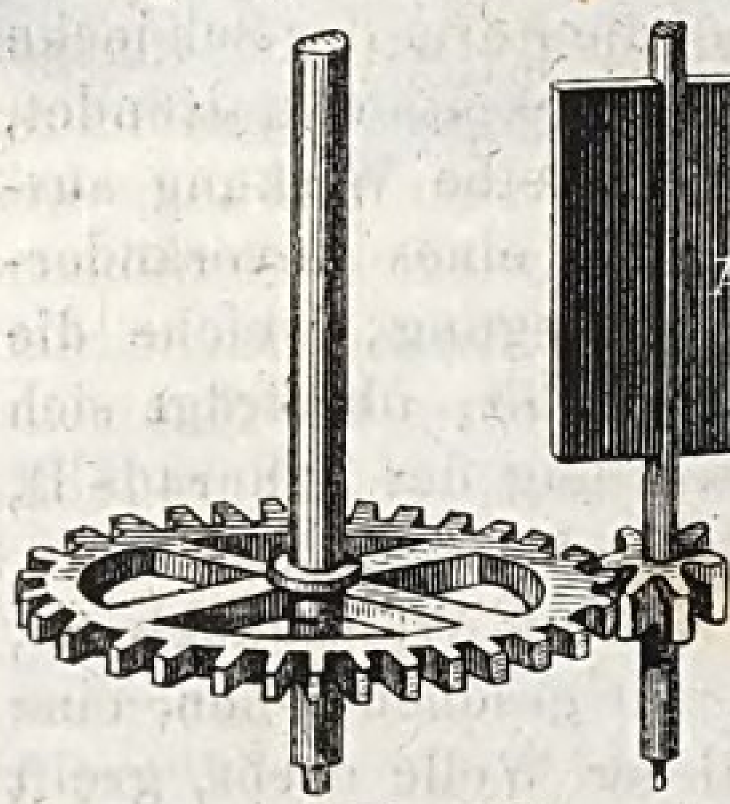


Fig. 318.

Die Natur des Widerstandes, der hier angewendet wird, um eine gleichförmige Bewegung zu erhalten, bietet, wie man sieht, einen wichtigen Vortheil dar, der darin besteht, dass seine Grösse von der Geschwindigkeit der Bewegung abhängt. Wenn durch irgend eine Ursache die Geschwindigkeit zu gross würde, so würden die Widerstände die Kraft überwiegen, und die Bewegung müsste sich wieder verzögern; wenn im Gegentheil die Geschwindigkeit einmal zu klein würde, so würde die Kraft ihrerseits grösser als die Widerstände werden, und die Bewegung müsste sich wieder beschleunigen. So gestattet die Anwendung des Widerstandes der Luft zur Regulirung der Bewegung eines Uhrwerks nicht allein, diese Bewegung gleichförmig zu machen,

sondern sie veranlasst auch noch, dass diese Bewegung nur mit einer ganz **bestimmten** Geschwindigkeit stattfinden kann.

Diese bestimmte Geschwindigkeit, mit welcher die gleichförmige Bewegung eines Uhrwerks, dessen Bewegung durch den Widerstand der Luft regulirt wird, stattfindet, hängt offenbar von der Grösse der bewegenden Kraft ab; denn die Bewegung wird ja nicht eher gleichförmig, als bis der Widerstand, welchen die Luft den Flügeln entgegensetzt, vermehrt um die übrigen passiven Widerstände, dieser Kraft das Gleichgewicht zu halten vermag. Wenn also die Bewegung während einer gewissen Zeit mit unveränderter Geschwindigkeit fortgesetzt wird, muss während dieser ganzen Zeit die Kraft mit der nämlichen Stärke wirken. Dies ist der Fall, wenn man sich eines Gewichtes als Motor bedient; wenn man aber eine Feder anwendet, so ist es nothwendig, dieselbe erst durch Vermittlung einer Schnecke wirken zu lassen.

Obgleich das Mittel, welches wir eben angegeben haben, auf den ersten Anblick ganz ausgezeichnet erscheint, so liefert es doch keine Bewegung, die regelmässig genug wäre, um zum Messen der Zeit verwendet werden zu können. Die Luft, welcher die Flügel begegnen, bietet sich denselben nicht immer unter den nämlichen Umständen dar; die geringste Bewegung, welche in der benachbarten Luftmasse stattfindet, modificirt die Art und Weise, auf welche die Flügel in ihrer Bewegung verzögert werden. Andererseits stört die geringste Aenderung in der Grösse der bewegenden Kraft und in der Grösse der Reibung der verschiedenen Stücke an einander das Gleichgewicht und in Folge dessen auch die Geschwindigkeit, die sich in der Weise verändert, dass das Gleichgewicht wieder hergestellt wird. Desshalb wendet man solche Mechanismen, deren Bewegung durch den Widerstand der Luft regulirt wird, nur zu solchen Zwecken an, für welche man keine so vollkommene Regelmässigkeit nöthig hat, als für das Messen der Zeit. Man bedient sich ihrer bei den Bratenwendern, oder bei den sich drehenden Wachsfiguren, welche man in den Läden der Friseure ausgestellt sieht, u. s. f. Ausserdem bedient man sich ihrer auch dann noch, wenn die Bewegung nur kurze Zeit dauern soll, wie in dem Apparat von *Morin*, der zum Beweis der Gesetze des freien Falls gehört (§. 118), und bei den registrirenden Instrumenten überhaupt. Mechanismen dieser Art werden endlich auch bei den Thurmuhren zur Bewegung desjenigen Theils ihres Werks angewandt, den man das Schlagwerk nennt. In mehreren der ge-

nannten Fälle bedient man sich eines Gewichts als Motor, und dann ist die Geschwindigkeit sehr nahe immer dieselbe; aber in vielen Fällen ist der Motor auch eine Feder, welche direkt auf das Räderwerk wirkt; dann ist zwar die Bewegung in jedem Augenblick vollständig regulirt, aber sie verzögert sich nach und nach, bis sie endlich ganz aufhört.

§. 210. Da man weder durch das Mittel, welches wir eben besprochen haben, noch durch irgend ein anderes eine hinreichend gleichförmige Bewegung hervorbringen kann, die zum Messen der Zeit dienen könnte, so ist man gezwungen, sich mit einer periodisch gleichförmigen Bewegung zu begnügen, deren Herstellung, obwohl auch sie grosse Schwierigkeiten darbietet, doch in sehr vollkommener Weise möglich ist. Zu diesem Zweck wendet man ein besonderes Stück an, das regelmässig oscillirt und welches bei jeder Oscillation die Bewegung des Räderwerks vollständig hemmt. Dadurch wird die Bewegung desselben intermittirend, und die Zeiger, welche sich zur Bezeichnung der Zeit über einem Zifferblatt bewegen, drehen sich nicht continuirlich um ihre Achse, sondern gehen ruckweise vorwärts; freilich ist die Grösse, um welche sie bei jedem solchen Ruck ihren Platz verändern, gewöhnlich so klein, dass das freie Auge nichts davon bemerkt, und dass ihre Bewegung eine ausserordentlich langsame, continuirliche zu sein scheint. Nur wenn der Zeiger sich schnell auf dem Zifferblatt bewegt, wie derjenige, welcher die Secunden angibt, dann ist seine Bewegung merklich discontinuirlich.

Das oscillirende Stück, von dem wir eben gesprochen haben, und dessen Oscillationen dazu dienen müssen, die Bewegung des Räderwerks periodisch zu machen, trägt den Namen Regulator. Die Theile, welche dazu bestimmt sind, die Verbindung zwischen dem Räderwerk und dem Regulator herzustellen, und durch welche die Bewegung des ersteren bei jeder Oscillation des Regulators gehemmt werden muss, heissen die Hemmung (Echappement, Gang).

§. 211. Der erste Regulator, welcher für Wand- und Taschenuhren angewendet worden ist, besteht aus einem Rädchen von Metall, welches um eine Achse beweglich ist, auf welche es in seinem Centrum befestigt wird. Dieses Rädchen, eine Art kleines Schwungrad, welches man mit dem Namen Unruh bezeichnet, macht jedoch nicht von selbst eine oscillirende Bewegung um seine Achse, nachdem ihm ein anfänglicher Impuls ertheilt worden ist; diese Oscillationen werden erst durch die Wirkung des

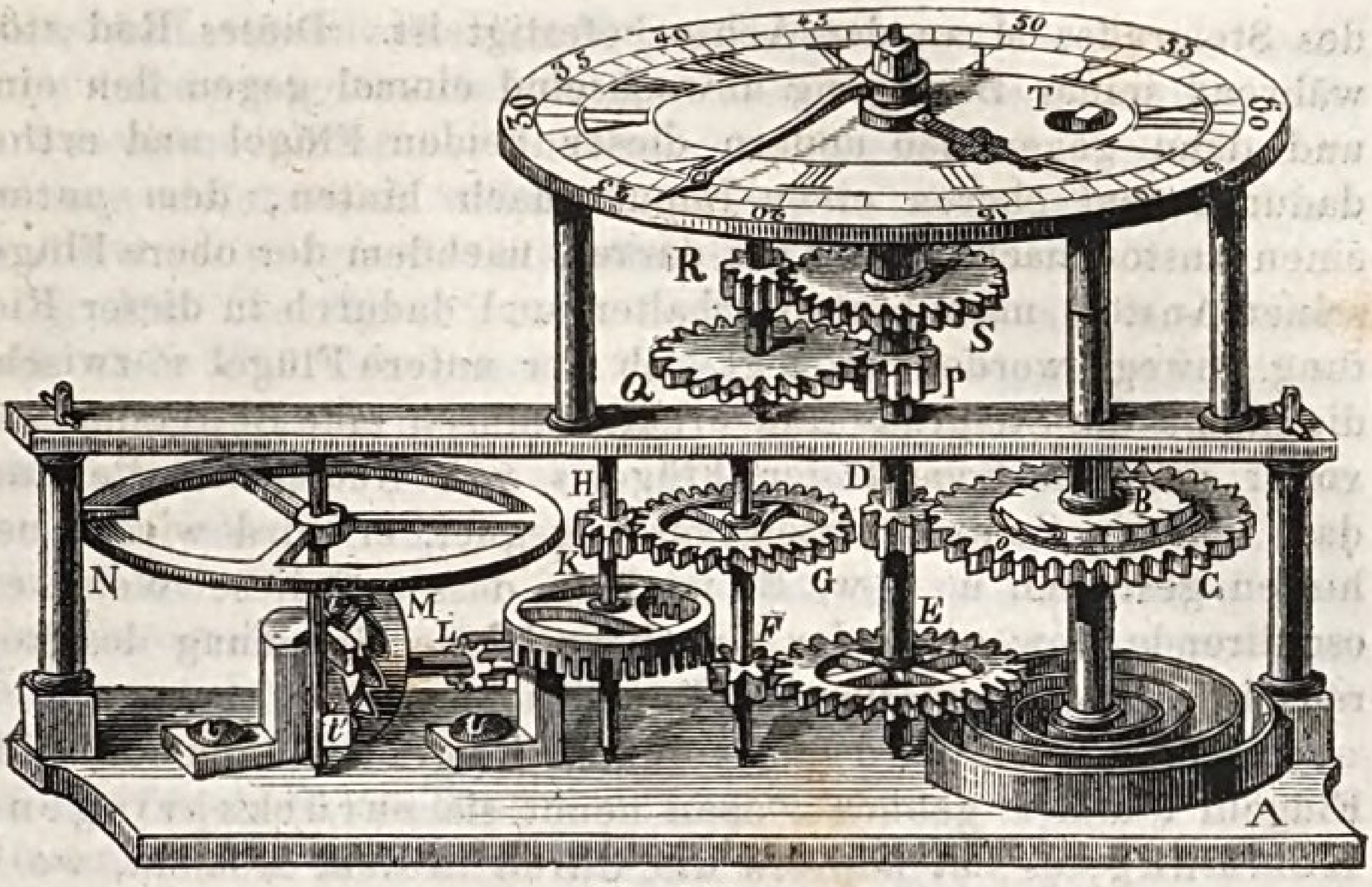


Fig. 319.

Motors selbst hervorgebracht, welche sich durch Vermittlung des Räderwerks und der Hemmung auf die Unruh überträgt. Die Art und Weise, wie dies geschieht, soll die Fig. 319 verständlich machen, welche zu gleicher Zeit dazu bestimmt ist, die allgemeine Anordnung einer Uhr zu zeigen; diese Figur wurde in der Weise gezeichnet, dass man sich die Räder in der Höhenrichtung von einander entfernt und die Achsen derselben in eine Ebene gelegt dachte, wodurch auf eine übersichtliche Art alle Einzelnheiten des Werks sichtbar werden.

Die Feder A, deren äusseres Ende festgehalten ist, sucht die Achse, mit welcher ihr inneres Ende in Verbindung steht, zu drehen. Diese Achse trägt ein Sperrrad B, welches durch Vermittlung der Sperrklinke *o* auf das Zahnrad C wirkt. Das Rad C bewegt das Trieb D und folglich auch das Rad E, das mit demselben auf einer Achse sitzt. Das Rad E treibt wieder das Trieb F und das Rad G, das seine Bewegung dem Trieb H mittheilt. Die Achse dieses Triebs bewegt mittelst des sog. Kronrades K und des Triebs L, welche wie konische Räder wirken, das Rad M um seine horizontale Achse. Vor diesem Rade M, dessen Zähne eine eigenthümliche Gestalt haben, und welches das Steigrad heisst, geht die Achse des Regulators vorbei. Diese Achse ist mit zwei Flügeln *i* und *i'*, aus kleinen Blechstückchen gebildet, versehen, welche einen rechten Winkel mit einander bilden, und von welchem der eine in gleicher Höhe mit dem obersten, der andere in gleicher Höhe mit dem untersten Theil

des Steigrades M an der Achse befestigt ist. Dieses Rad stösst während seiner Bewegung abwechselnd einmal gegen den einen und dann gegen den andern dieser beiden Flügel und ertheilt dadurch dem oberen einen Impuls nach hinten, dem unteren einen Anstoss nach vorn. Kurz darauf, nachdem der obere Flügel *i* seinen Anstoss nach hinten erhalten und dadurch in dieser Richtung bewegt worden ist, legt sich der untere Flügel *i'* zwischen die Zähne des Steigrads und erhält dadurch eine Bewegung nach vorn; dadurch kommt der Flügel *i* von Neuem in die Lage, dass ihm ein Zahn des Steigrads begegnet, er wird wieder nach hinten gestossen u. s. w. Es ist klar, dass auf diese Weise eine oscillirende Bewegung der Unruh und eine Hemmung des Steigrads bei jeder Oscillation zu Stande kommt.

Die Hemmung wird hier von dem Steigrade M und den beiden Flügeln *i* und *i'* gebildet: man nennt sie zurückspringende Hemmung; es hat nämlich die Unruh in dem Moment, wo bei jeder ihrer Oscillationen einer der Flügel gegen einen der Zähne des Steigrades stösst, ihre Bewegung, die ihr durch den vorhergehenden Impuls in entgegengesetzter Richtung ertheilt worden ist, noch nicht vollständig verloren, und sie ertheilt daher durch Vermittlung dieses Flügels dem Steigrad in entgegengesetzter Richtung seiner Bewegung einen Anstoss, der dieses Rad zurückspringen macht. Die Achse der Unruh mit den beiden Flügeln heisst die Spindel, und desshalb erhalten die Taschenuhren, die mit dieser Hemmung versehen sind, den Namen Spindeluhren. Die Bewegung ist jedoch durch die Anwendung der Unruh mit der zurückspringenden Hemmung nur in unvollkommener Weise regulirt. Jede Oscillation, welche die Unruhe macht, wird ihr durch die Wirkung eines Zahns des Steigrads auf einen der Flügel mitgetheilt; diese Oscillation findet daher mit einer grösseren oder geringeren Schnelligkeit statt, je nachdem der von den Zähnen auf die Flügel ausgeübte Druck von grösserer oder geringerer Stärke ist. Die Aenderungen, welche in der Grösse der bewegenden Kraft vorkommen können und welche nothwendig vorkommen müssen, wenn man eine Feder ohne Schnecke anwendet, sowie diejenigen Aenderungen, welche sich in der Grösse der Reibung der verschiedenen Stücke aneinander geltend machen, Aenderungen, welche besonders durch Verdickung des zum Schmieren angewendeten Oels hervorgerufen werden, sind ebenso viele Ursachen, welche bewirken, dass die Flügel nicht immer denselben Impuls erhalten, und dass folglich die auf einander folgenden Oscillationen der Unruh nicht von gleicher

Dauer sind. Damit die Art Regulirung, welche wir eben angegeben haben, angewendet werden kann, ist es nothwendig, dass die bewegende Kraft so constant als möglich ist, und dass die Reibung, welche sich während der ganzen Dauer der Bewegung entwickelt, eine grosse Gleichförmigkeit besitzt.

§. 212. Die Fig. 319 zeigt noch, auf welche Art das Räderwerk einer Uhr den Stunden- und Minutenzeiger um ein und dieselbe Achse mit verschiedener Geschwindigkeit über das Zifferblatt bewegt. Die Achse des Rades E verlängert sich nach oben; an ihrem Ende ist der Minutenzeiger festgemacht. Es müssen also die Feder und der Regulator so angeordnet sein, dass diese Achse eine Umdrehung in einer Stunde macht. Auf derselben Achse ist ein Trieb befestigt, welches in ein Rad Q, das Wechselrad, eingreift; die Achse des Rades Q trägt ausserdem ein Trieb R, welches das Rad S bewegt. Dieses letztere Rad ist an einem hohlen Cylinder befestigt, innerhalb dessen sich die Achse des Minutenzeigers frei bewegen kann; an dem Ende dieses hohlen Cylinders ist der Stundenzeiger angebracht. Auf diese Weise können sich die beiden Zeiger um ein und dasselbe Centrum mit ungleicher Geschwindigkeit bewegen. Das Trieb P hat 8 Zähne, während das Rad Q 24 hat; der Minutenzeiger macht also drei Umdrehungen, während das Rad Q eine macht. Ferner hat das Trieb R 8 Zähne, das Rad S aber 32, sodass das Rad Q vier Umdrehungen vollendet, während das Rad S nur eine einzige macht. Während also der Minutenzeiger 12 Umdrehungen macht, dreht sich das Rad S ein einzigesmal herum und ertheilt also dem hohlen Cylinder, auf welchen der Stundenzeiger gesteckt ist, die passende Geschwindigkeit.

Der ganze Theil des Uhrwerks, welcher aus den vier Rädern und Trieben P, Q, R, S, sowie aus den beiden Zeigern, dem Stunden- und Minutenzeiger, besteht, erhält seine Bewegung allein durch die Achse des Rades E. Die Uebertragung der Bewegung von dieser Achse auf jenen Mechanismus, der sich unmittelbar unter dem Zifferblatt befindet, geschieht aber auf eine solche Art, dass man die Zeiger bewegen (richten) kann, ohne das Rad E mitzudrehen. Zu diesem Zweck sind statt einer einzigen Achse, welche das Rad E, die Triebe D und P und den Minutenzeiger trägt, deren zwei, in einer geraden Linie gelegene, vorhanden, von denen die eine am Ende der andern angebracht ist; die untere dieser beiden Achsen trägt das Rad E und das Trieb D; die andere das Trieb P und den Minutenzeiger. Die erstere Achse ist an ihrem Ende hohl, und in ihre Höhlung ist das Ende

der anderen Achse gesteckt, sodass sich dieselbe nur mit einiger Reibung in dieser Höhlung drehen kann. Wenn sich folglich eine dieser Achsen dreht, so nimmt sie die andere mit, vorausgesetzt dass letztere nicht einen Widerstand erfährt, der zu gross ist, als dass er von jener Reibung überwunden werden könnte. Wenn sich das Rad E dreht, so nimmt es das Trieb P und die beiden Zeiger mit fort, weil die Bewegung derselben nur einen geringen Widerstand darbietet; aber wenn man im Gegentheil die Zeiger richten will, indem man direkt den Minutenzeiger dreht, so nimmt die Achse dieses Zeigers die Achse des Rades E in seiner Bewegung nicht mit, da sich zugleich mit dem Rade E der ganze übrige Uhrmechanismus bewegen müsste und daher der Widerstand zu gross würde. Mit dem Minutenzeiger drehen sich folglich nur die Räder und Triebe P, Q, R, S und der Stundenzeiger, alle anderen Räder des Uhrwerks bleiben in Ruhe.

§. 213. Die Feder, welche das ganze Uhrwerk (Fig. 319) in Bewegung setzt, kann nicht unaufhörlich wirken. Wenn sie sich abgespannt hat, ist es nothwendig, sie von Neuem zu spannen, wenn die Bewegung fortdauern soll. Dieses Geschäft nennt man das Aufziehen der Uhr. Man steckt dabei über das quadratische Ende T der Achse, an welcher die Feder A mit ihrem inneren Ende befestigt ist, einen Schlüssel und dreht mit Hilfe desselben diese Achse in entgegengesetztem Sinn, in welchem sie gewöhnlich von der Wirkung der Feder gedreht wird. Wenn das Rad C mit dieser Achse fest verbunden wäre, so müsste es sich auch während des Aufziehens mit ihr drehen, und es würde daher der ganze Mechanismus mit Inbegriff der Zeiger in die rückgängige Bewegung jener Achse mit hineingezogen werden. Damit dies nicht geschieht, ist das Rad C auf die Achse der Feder A nur lose aufgeschoben und erhält seine Bewegung von dieser Achse erst durch Vermittlung eines Sperrrads B und der Sperrklinke *o*, von welchen das erstere an jener Achse, die letztere aber an dem Rade C festgemacht ist und durch eine kleine Druckfeder fortwährend gegen das Sperrrad angedrückt wird. Auf diese Art wird das Rad C nur dann von seiner Achse mit fortgenommen, wenn diese der Wirkung der gespannten Feder folgt; wenn man dagegen, um die Uhr aufzuziehen, diese Achse in entgegengesetztem Sinne dreht, so wird blos das Sperrrad B mit herumgenommen, während seine Zähne nach und nach unter der Sperrklinke vorbeigehen und dadurch jenes eigenthümliche Geräusch verursachen, das Jedermann kennt. In Folge dieser An-

ordnung bleiben also sämmtliche Räder und daher auch die Zeiger während der ganzen Dauer des Aufziehens unbeweglich.

§. 214. Kehren wir nun wieder zur weiteren Betrachtung des Regulators zurück. Das Pendel wurde zuerst von *Huighens* ums Jahr 1657 dazu angewandt, die Bewegung einer Uhr zu reguliren, und wie wichtig dieser Schritt war, geht schon daraus hervor, dass es erst von da an möglich wurde, die grosse Genauigkeit in der Zeitmessung zu erreichen, welche man von gut construirten Uhren verlangt. Wie grosse Sorgfalt man auch auf die Einrichtung des ganzen Mechanismus zu dem Zweck, dass der Regulator eine constante Einwirkung von Seite des Motors erfahre, verwenden mag, so ist dies doch immer nur unvollkommen erreichbar; es ist daher von der grössten Wichtigkeit, dass der Regulator die Eigenschaft habe, dass die Dauer seiner Oscillationen in keiner Weise von der Stärke dieser Einwirkungen beeinflusst wird. Dies ist aber eben bei dem Pendel der Fall, dessen Schwingungen, vorausgesetzt, dass sie nur klein sind, eine von ihrer Grösse unabhängige Dauer haben. Wenn die Grösse der Schwingungen eines Pendels, das als Regulator gebraucht wird, durch die ungleiche Einwirkung des Motors auch bald etwas grösser, bald etwas kleiner werden, so bleibt doch ihre Dauer, wenigstens sehr nahezu, dieselbe, und sie eignen sich daher in hohem Grade dazu, die Bewegung eines Uhrwerks zu reguliren. Uebrigens ist dies jedoch kein Grund, weniger Sorgfalt darauf zu verwenden, dass die Wirkung des Motors auf den Regulator so gleichförmig als möglich sei, wenn man einen sehr grossen Grad von Vollkommenheit in dem Maass der Zeit erreichen will.

Das Pendel wird mit dem Räderwerk der Uhr gewöhnlich durch die sog. Ankerhemmung in Verbindung gesetzt. Diese Hemmung ist im Wesentlichen in Fig. 320 dargestellt und soll nun näher beschrieben werden. Ein Stück ABC, der Anker genannt, ist an einer horizontalen Achse D befestigt und erhält durch Vermittlung derselben von dem Pendel eine oscillirende Bewegung um diese Achse. Zwischen seinen Enden A und C befindet sich ein Rad E, das Steigrad, welches an der letzten Welle des Uhrwerks befestigt ist und welches der Motor fortwährend zu drehen sucht. Die Zähne dieses Rades berühren abwechselnd die untere Seite Am des Theiles A des Ankers und die obere Seite p des Theiles C. Diese beiden Seiten sind nach concentrischen Kreisbögen, deren Mittelpunkt in der Achse D liegt, abgeschnitten, sodass während der ganzen Zeit, in welcher

ein Zahn des Rades E mit einem der Enden des Ankers in Berührung ist, dieser Zahn und somit das ganze Rad vollkommen unbeweglich bleibt. Es findet hier also gerade das Gegentheil von dem statt, was bei der zurückspringenden Hemmung vor sich geht, wo der betreffende Zahn des Steigrads sich fortwährend bewegt, obgleich er in Berührung mit dem Flügel ist, welcher ihn zu hemmen sucht. Man nennt desshalb die Ankerhemmung auch r u h e n d e Hemmung.

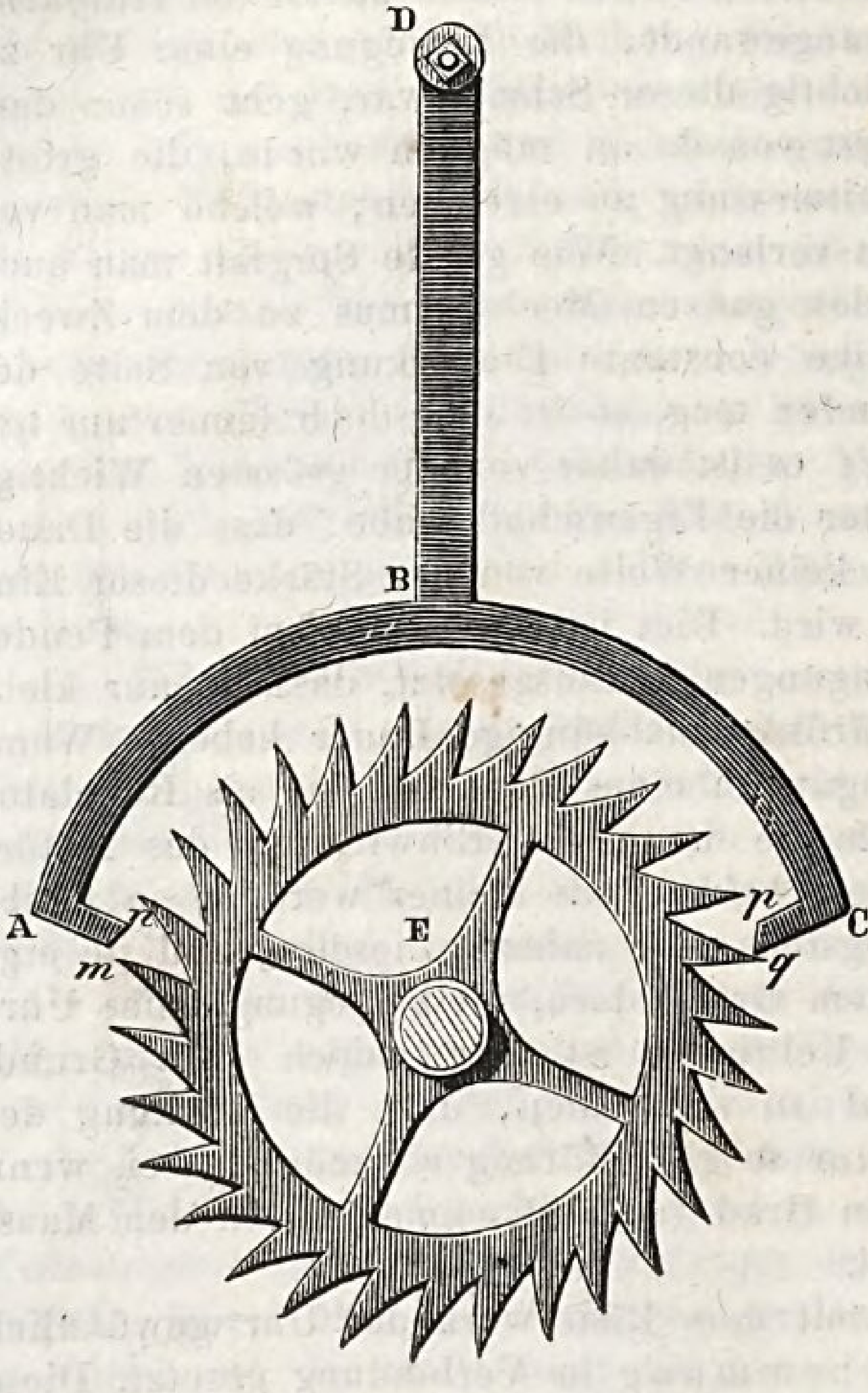


Fig. 320.

Die beiden Enden A und C des Ankers zeigen zunächst dem Rade E zwei Flächen *mn* und *pq*, welche in entgegengesetztem Sinne geneigt sind und auf welchen die Zähne des Rades in dem Augenblick, wo sie ausgelöst werden, gleiten müssen. Während dieses Gleiten stattfindet, übt der betreffende Zahn gegen den Anker einen Druck aus, der die Geschwindigkeit desselben zu beschleunigen sucht; das Pendel, das in diesem Augenblick eben eine neue Schwingung begonnen hat, erhält also durch Vermittlung des Ankers einen Impuls, der sich bei jeder neuen Schwingung wiederholt und auf diese Weise die Fortdauer der Schwingungen ermöglicht. Ohne jene zwei kleinen schiefen Ebenen würde die Grösse der Schwingungen des Pendels fort und fort abnehmen. Der Widerstand der Luft, die Reibung an der Aufhängeachse, sowie die Reibung der Zähne des Steigrads auf den entsprechenden Flächen A*m* und *p* des Ankers würden nach kurzer Zeit die Schwingungen des Pendels

so klein machen, dass die Zähne des Steigrads nicht mehr vorbei könnten und die Uhr stehen bleiben müsste.

Die Fig. 321 zeigt, auf welche Art der Anker mit dem Pendel in Verbindung gesetzt ist. Die horizontale Achse D, an welcher er befestigt ist, trägt am Ende einen Stab F, welcher sich unten in eine horizontale Gabel G umbiegt. Zwischen den Armen dieser Gabel geht die Stange des Pendels hindurch, sodass dasselbe nicht schwingen kann, ohne zugleich den Anker mitzunehmen.

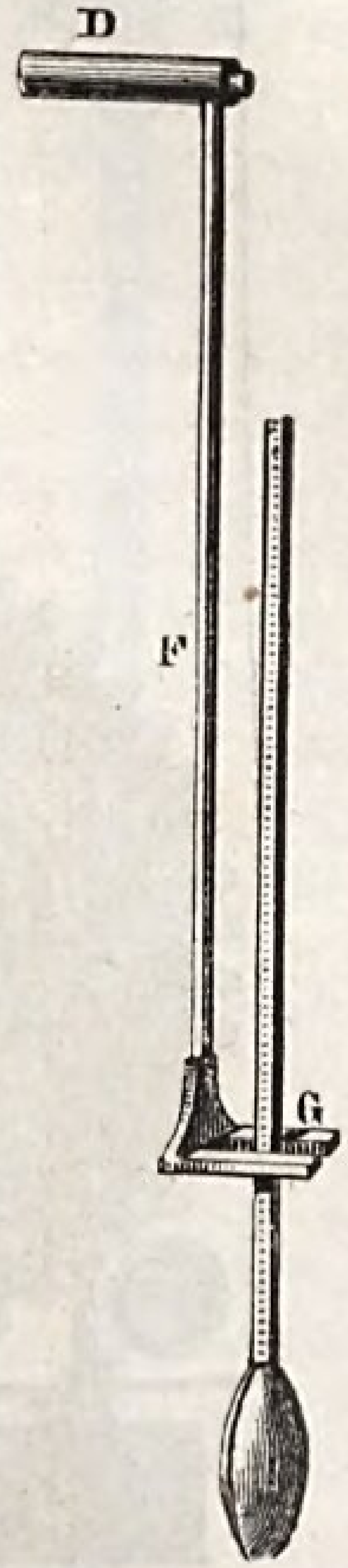


Fig. 321.

Bei der zurückspringenden Hemmung wirkt der Motor fortwährend auf den Regulator, um dessen Bewegung zu modificiren; bei der Ankerhemmung dagegen ist der Einfluss des Motors auf den Regulator grösstentheils verschwunden. Dieser Einfluss besteht nur noch in der Reibung der Zähne des Steigrads auf den Seitenflächen des Ankers, die jedoch fast zu Null gemacht werden kann, und in den Impulsen, welche der Anker von den Zähnen in dem Moment erhält, wo sie ihn verlassen. Verbindet man damit die werthvolle Eigenschaft des Pendels, welche oben bereits genannt worden ist, so wird man einsehen, wie es möglich ist, den Grad der Vollkommenheit zu erreichen, den die Uhren als Zeitmesser heut zu Tage besitzen.

Die Dauer, welche jede Schwingung des Pendels, welches als Regulator einer Uhr dient, haben muss, ist durch die Verbindung bestimmt, welche zwischen dem Minutenzeiger und dem Steigrade besteht. Um also auf den Gang einer Uhr einwirken zu können, um sie so richten zu können, dass sie weder zu schnell noch zu langsam geht, ist es nothwendig, dass man dem Pendel die richtige Länge geben kann, damit es seine Schwingungen genau in der gehörigen Zeit ausführt. Zu dem Ende ist die Linse des Pendels an dem Stabe nicht völlig festgemacht, sondern kann längs desselben verschoben und am passenden Orte mittelst einer Klemmschraube festgestellt werden. Wenn die Uhr zu schnell geht, so kommt dies daher, dass die Schwingungsdauer des Pendels zu klein ist; man wird folglich dieselbe verlängern, indem man die Länge des Pendels durch Senken der Linse grösser macht. Wenn im Gegentheil die Uhr zu langsam geht, so wird die Linse gehoben.

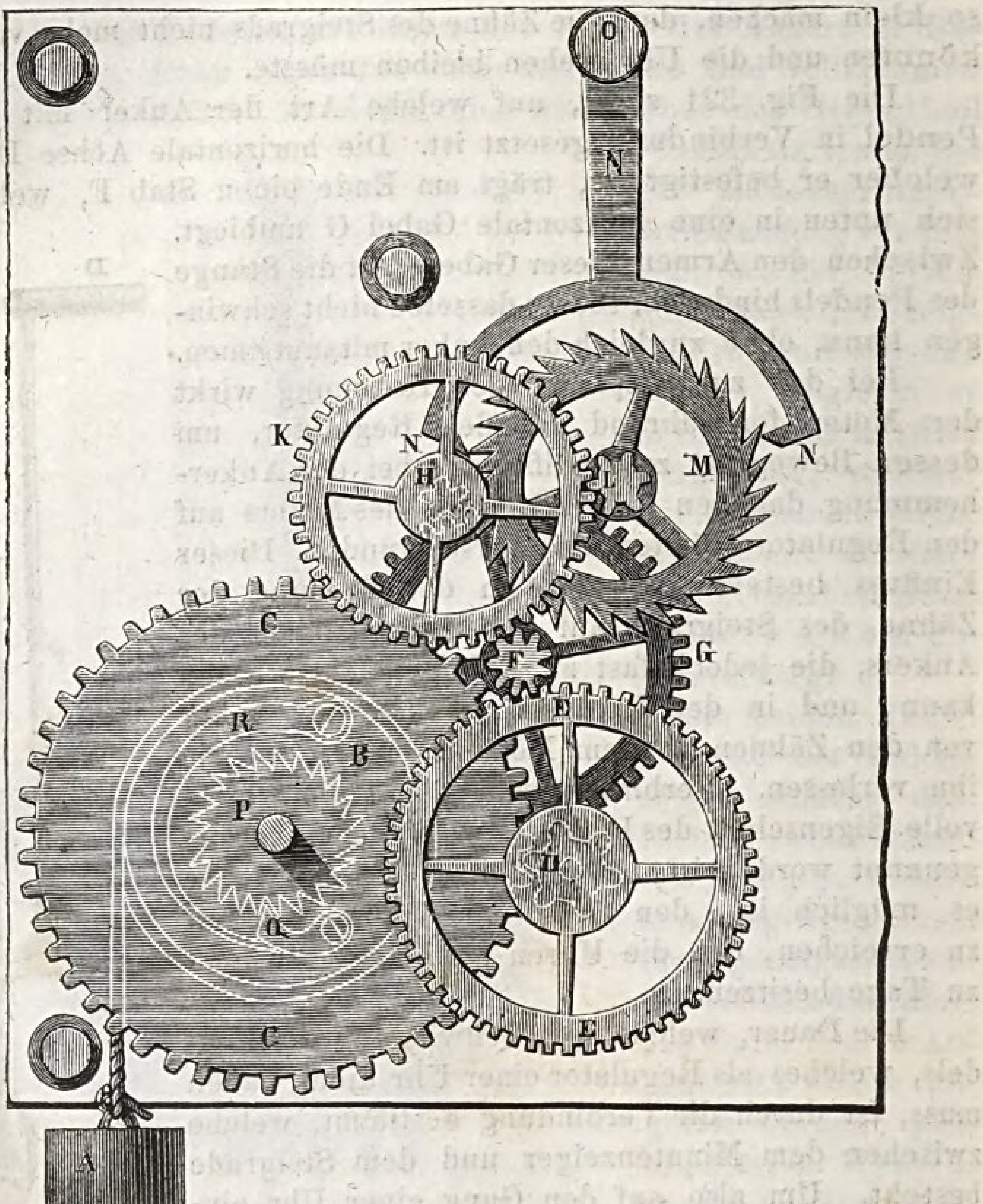


Fig. 322.

§. 215. Die Figuren 322 und 323 zeigen eine Uhr, deren Bewegung durch ein Pendel mit Ankerhemmung regulirt ist. Das bewegende Gewicht A wirkt am Ende einer Schnur, welche um die Rolle B geschlungen ist. Es sucht folglich diese Rolle zu drehen und mit dieser das Zahnrad C. Dieses greift in ein Trieb D, dessen Achse ein zweites Rad E trägt; in dieses Rad greift ein Trieb F, auf dessen Achse ein drittes Rad G befestigt ist; dieses dritte Rad greift nun seinerseits wieder in das Trieb H, auf dessen Achse sich ein viertes Rad K befindet; das Rad K endlich greift in das Trieb L, dessen Achse das Steigrad M trägt. Der Anker NN, der um die Achse O beweglich ist, umfasst den

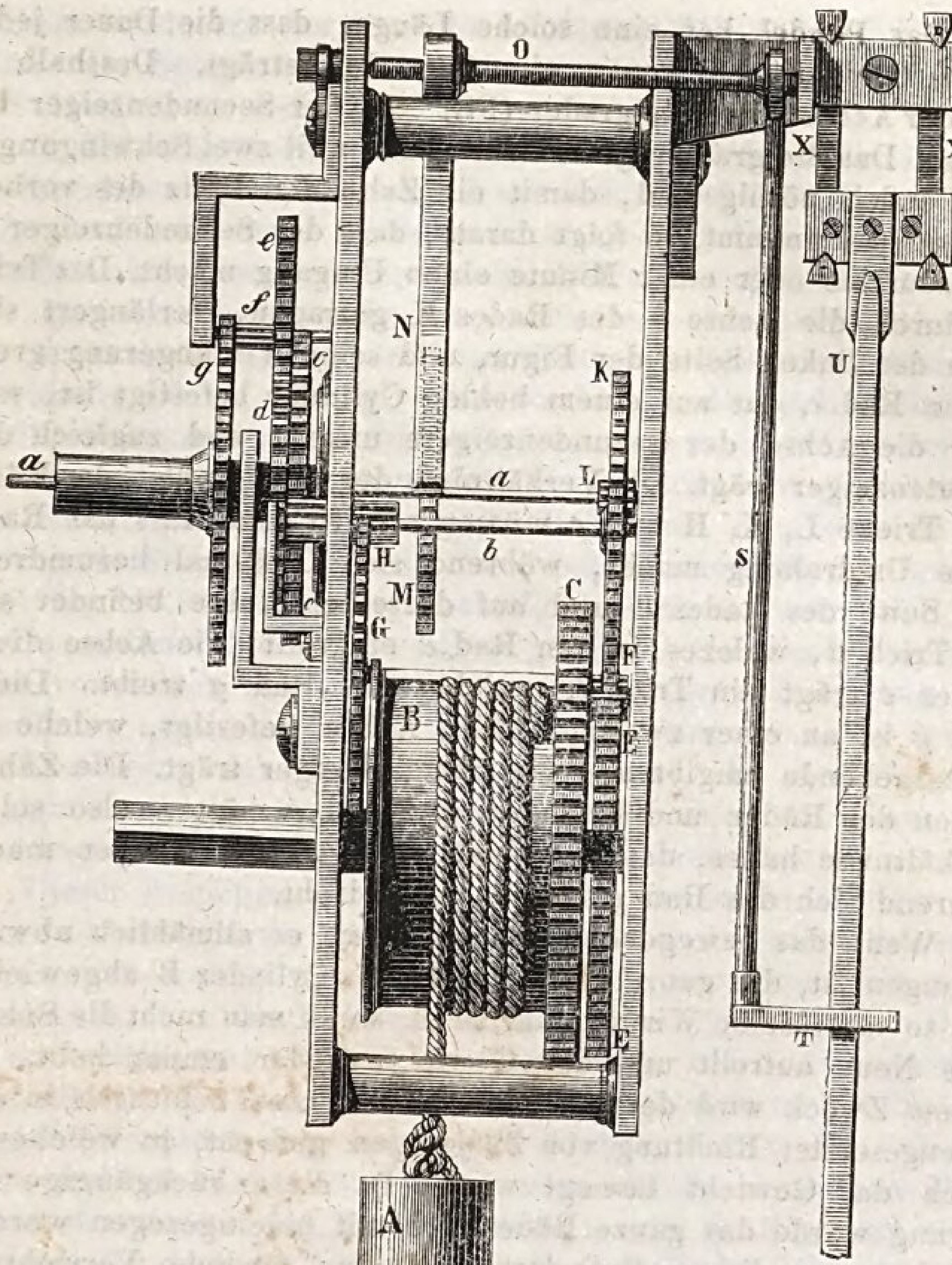


Fig. 323.

oberen Theil des Steigrades M. Die Achse O (Fig. 323) trägt einen Stab S, welcher sich unten in eine Gabel T endigt. Zwischen den Armen dieser Gabel geht der Stab UU des Pendels hindurch, dessen Linse V ist. Das Pendel ist an zwei kurzen Streifen dünner Stahlfedern X, X aufgehängt, welche sich leicht in dem einen oder anderen Sinne biegen, je nachdem das Pendel schwingt.



Das Pendel hat eine solche Länge, dass die Dauer jeder seiner Oscillationen genau eine Secunde beträgt. Desshalb ist auf der Achse *a* des Steigrades (Fig. 323) der Secundenzeiger befestigt. Das Steigrad trägt 30 Zähne, und weil zwei Schwingungen des Pendels nöthig sind, damit ein Zahn den Platz des vorhergehenden einnimmt, so folgt daraus, dass der Secundenzeiger in 60 Secunden oder einer Minute einen Umgang macht. Das Trieb H, durch die Achse *b* des Rades K getragen, verlängert sich nach der linken Seite der Figur, und seine Verlängerung greift in ein Rad *c*, das auf einem hohlen Cylinder befestigt ist, welcher die Achse des Secundenzeigers umgibt und zugleich den Minutenzeiger trägt. Die Verhältnisse der Zähnezahlen der Räder und Triebe L, K, H und *c* müssen also so sein, dass das Rad *c* eine Umdrehung macht, während sich L 60mal herumdreht. Zur Seite des Rades *c* und auf derselben Achse befindet sich ein Trieb *d*, welches in ein Rad *e* eingreift; die Achse dieses Rades *e* trägt ein Trieb *f*, welches das Rad *g* treibt. Dieses Rad *g* ist an einer zweiten hohlen Achse befestigt, welche die vorhergehende umgibt und den Stundenzeiger trägt. Die Zähnezahlen der Räder und Triebe *d*, *e*, *f* und *g* müssen also solche Verhältnisse haben, dass das Trieb *d* zwölf Umdrehungen macht, während sich das Rad *g* einmal herumdreht.

Wenn das bewegende Gewicht, indem es allmählich abwärts gegangen ist, die ganze Schnur von dem Cylinder B abgewickelt hat, so muss seine Wirkung aufhören, wenn man nicht die Schnur auf's Neue aufrollt und das Gewicht wieder empor hebt. Zu diesem Zweck wird der Cylinder mittelst eines Schlüssels in entgegengesetzter Richtung von derjenigen gedreht, in welcher er durch das Gewicht bewegt wird. In diese rückgängige Bewegung würde das ganze Räderwerk mit hineingezogen werden, wenn man an diesem Cylinder nicht eine ähnliche Vorrichtung angebracht hätte wie diejenige ist, die wir an der Fig. 319 beschrieben haben. An der Achse des Cylinders B (Fig. 322) ist ein Sperrrad P befestigt, welches sich mit diesem Cylinder dreht, in welchem Sinne er auch bewegt wird. Zwischen die Zähne dieses Rades P legt sich eine Sperrklinke Q, welche eine Feder R fortwährend gegen das Sperrrad andrückt. Sperrklinke und Feder sind auf dem Zahnrade C befestigt, das nur lose auf die Achse des Cylinders aufgeschoben ist. Wenn sich der Cylinder B unter der Wirkung des Gewichtes A bewegt, so wird das Rad C durch Vermittlung des Sperrrads und der Sperrklinke mitgenommen; wenn aber der Cylinder in entgegengesetzter Richtung

gedreht wird, um das Gewicht wieder zu heben, so gleiten die Zähne des Sperrrads nach und nach unter der Sperrklinke weg, und das Rad C wird nicht mitbewegt.

§. **216.** Die Vortheile, welche die Anwendung des Pendels als Regulator darbietet, erstrecken sich ausschliesslich auf feststehende Uhren, denn es ist wohl klar, dass die verschiedenen, oft plötzlichen Bewegungen, welche die Taschenuhren zu erleiden, und die verschiedenen Lagen, welche sie einzunehmen haben, die Oscillationen des Pendels und damit das Spiel der Hemmung vollständig stören würden. Man war daher darauf bedacht, für die Taschenuhren einen besonderen Regulator zu erdenken, welcher mit der Beweglichkeit des ganzen Werks nicht unvereinbar wäre, und der zu gleicher Zeit so gut als möglich die Vortheile des Pendels besässe. Die oben (§. 211) beschriebene Unruhe genügt wohl der ersten Bedingung, aber sie ist weit davon entfernt, die zweite zu befriedigen. Wir haben gesehen, dass dieser Regulator nicht von selber schwingt, sondern seine ganze Bewegung von dem Motor erhält und daher in seinen Schwingungen die Spuren der Aenderung der Kraft des Motors zeigt. Es war wiederum *Huyghens*, welcher den Regulator für Taschenuhren erfand, der heute noch ausschliesslich für dieselben gebraucht wird.

Dieser Regulator besteht aus nichts Anderem als der Unruhe, von welcher wir oben gesprochen haben, versehen mit einer Spiralfeder, welche ihr die Eigenschaft gibt, von selber zu schwingen, ohne die Wirkung des Motors nöthig zu haben. Diese Feder, welche gewöhnlich blos die Spirale heisst, hat dieselbe Form wie die Motorfeder, welche oben beschrieben und in Fig. 263 dargestellt wurde; aber sie ist viel dünner, fast so fein wie ein Haar, und hat folglich auch viel weniger Kraft. Ihr inneres Ende ist an der Achse der Unruh befestigt, wie es Fig. 324 zeigt, während ihr äusseres Ende mit dem Gestell der Uhr in fester Verbindung steht. Die Spirale nimmt natürlich eine gewisse Gleichgewichtsform an; wenn man die Unruh in dem einen oder anderen Sinn bewegt, so wird die Spirale aus dieser Form gebracht und sucht, wieder freigelassen, in Folge ihrer Elasticität ihre vorige Gestalt wieder einzunehmen und die Unruh in ihre ursprüngliche Lage wieder zurückzuführen. Aber in dem Moment, wo die Spirale ihre Gleichgewichtsgestalt wieder annimmt, besitzt die Unruh eine gewisse

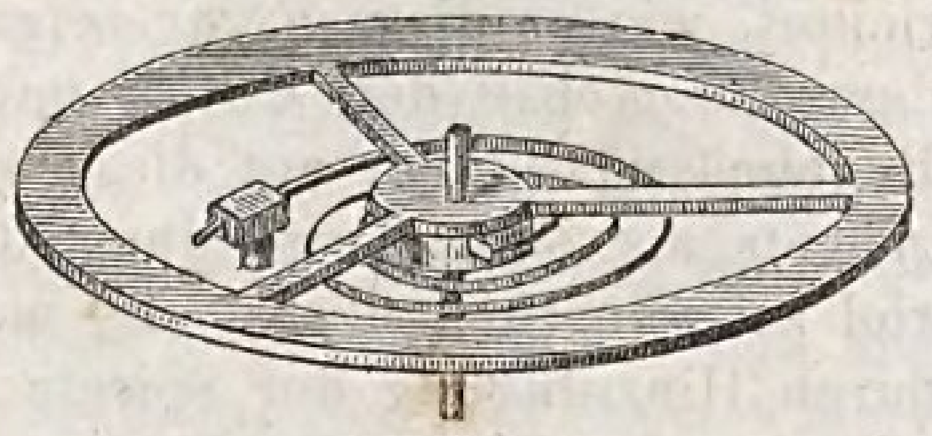


Fig. 324.

Geschwindigkeit, in Folge deren sie fortfährt, sich in demselben Sinne zu drehen; die Spirale wird dadurch gezwungen, ihre Gestalt im entgegengesetzten Sinn von vorher zu ändern und setzt folglich der Unruh einen immer mehr wachsenden Widerstand entgegen, der sie bald zur Ruhe bringt. Die Spirale aber fährt fort, auf die Unruh zu wirken, und führt dieselbe von Neuem in ihre ursprüngliche Gleichgewichtslage zurück; diese wird jedoch wieder überschritten u. s. w. Die mit einer Spirale versehene Unruh schwingt also, nachdem ihre Gleichgewichtslage gestört worden ist, von einer Seite derselben auf die andere in ähnlicher Weise, wie ein Pendel von einer Seite der Vertikalen auf die andere schwingt. Gewissermassen ist also die Spirale an der Unruh dasselbe, was die Schwere bei dem Pendel. Es ist ausserdem wichtig zu bemerken, dass die Dauer der Schwingungen der Unruh, vorausgesetzt, dass die Spirale richtig construirt ist, von der Amplitude dieser Schwingungen unabhängig ist.

§. 217. Zur vollständigen Regulirung des Uhrwerks reicht es jedoch nicht aus, dass die Dauer der Schwingungen, welche eine mit einer Spirale versehene Unruh macht, wenn sie ungehindert und frei schwingen kann, unabhängig von der Grösse dieser Schwingungen ist; es ist ausserdem noch nothwendig, dass die Hemmung so sei, dass die Unruh der Einwirkung des Motors so viel als möglich entzogen ist, einer Einwirkung, welche die Dauer der Schwingungen ungleich modificiren würde, je nachdem sie kräftiger oder weniger kräftig wäre.

Man hat lange Zeit hindurch, und bei den sogenannten Spindeluhren geschieht dies noch, die zurückspringende oder die Hemmung mit Flügeln angewandt, welche wir schon in Fig. 267 kennen gelernt haben. In diesem Fall ist der Theil des Mechanismus, der zur Regulirung der Bewegung dient, genau so eingerichtet, wie es diese Figur zeigt, mit dem einzigen Unterschied, dass die Achse der Unruh mit der Spirale versehen ist. Die Regelmässigkeit der auf diese Art erhaltenen Bewegung ist wohl grösser als ohne Anwendung der Spirale; aber sie lässt noch viel zu wünschen übrig. Es musss eben nicht allein die Unruh durch Hinzufügung der Spirale vervollkommnet werden, sondern es ist auch nöthig, die Hemmung selbst durch eine bessere zu ersetzen. Wir wollen nun die wichtigsten von den Hemmungen, welche man an der Stelle der zurückspringenden anwendet, und durch welche in der That eine hohe Vollkommenheit in dem Messen der Zeit erreicht worden ist, näher betrachten.

Zunächst ist hier wieder die Ankerhemmung zu nennen. Man hat nämlich mit der Achse der Unruh ein ganz ähnliches Stück, Anker genannt, verbunden, wir wir es oben in §. 214 bei den Pendeluhren beschrieben haben. Dasselbe schwingt mit der Unruh in horizontaler Richtung hin und her, und seine Enden greifen in ein ebenfalls horizontal liegendes Steigrad, das ähnlich wie bei den Pendeluhren gestaltet ist. Die Art der Wirksamkeit dieser Hemmung ist ähnlich wie bei den Pendeluhren, und wir können daher in dieser Beziehung auf das im §. 214 Gesagte verweisen. Taschenuhren, die mit dieser Hemmung versehen sind, heissen gewöhnlich Ankeruhren.

In den jetzt fast allgemein in Gebrauch gekommenen Taschenuhren, die gewöhnlich Cylinderuhren heissen, ist die sog. Cylinderhemmung angebracht. Die Achse der Unruh, anstatt wie bei der zurückspringenden Hemmung zwei Flügel zu tragen, ist auf einem Theil ihrer Länge in besonderer Weise eingeschnitten. Die Fig. 325 zeigt die Form, welche man ihr gibt. Der Theil *ab* ist auf einen halb aufgeschnittenen hohlen Cylinder reducirt, in dessen unterem Theil noch ein weiterer Einschnitt *c* angebracht ist. Der über diesem Einschnitt noch vollständig vorhandene Halbcylinder spielt die wichtigste Rolle bei der Hemmung. Das letzte Rad des Uhrwerks, das Steigrad, ist in einer zur Achse der Unruh senkrechten Ebene gelegen, und seine vertikal aufwärts gebogenen Zähne greifen in den aufgeschnittenen Cylinder, welchen jene Achse trägt (Fig. 326). Die Figuren 327 und 328 zeigen, wie dieser Cylinder abwechselnd die Zähne des Steigrades anhält und dann wieder vorbeigehen lässt. In Folge der Schwingungen der Unruh dreht sich der Cylinder A um das Centrum B bald in dem einen, bald in dem anderen Sinn. In Fig. 327 trifft eben ein Zahn mit seiner Spitze gegen die äussere Oberfläche des Cylinders und wird folglich so lange angehalten, als er mit dieser Oberfläche in Berührung bleibt; aber bald nimmt der Cylinder die in Fig. 328 dargestellte Stellung ein, und derselbe Zahn C, welcher unterdessen unter der Wirkung des Motors ein Stück weiter gehen konnte, trifft nun gegen die innere Fläche des Cylinders, von welcher er gleichfalls so lange angehalten wird, als er mit ihr in Berührung steht. Wenn sich hierauf der Cylinder abermals um seine Achse dreht, um die in Fig. 327 dargestellte Lage wieder einzunehmen, so lässt er den Zahn C ganz vorbeigehen und arretirt dafür den folgenden, zuerst wieder mit seiner äusseren Oberfläche, u. s. w.

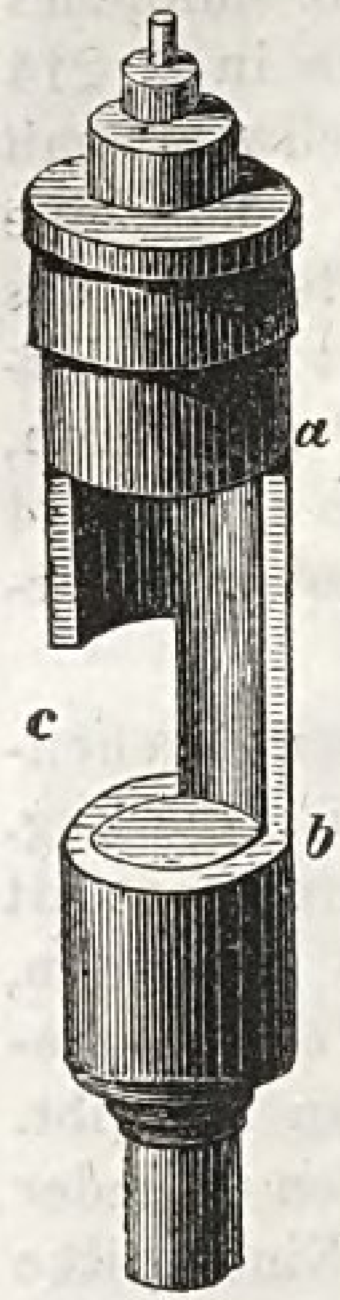


Fig. 325.

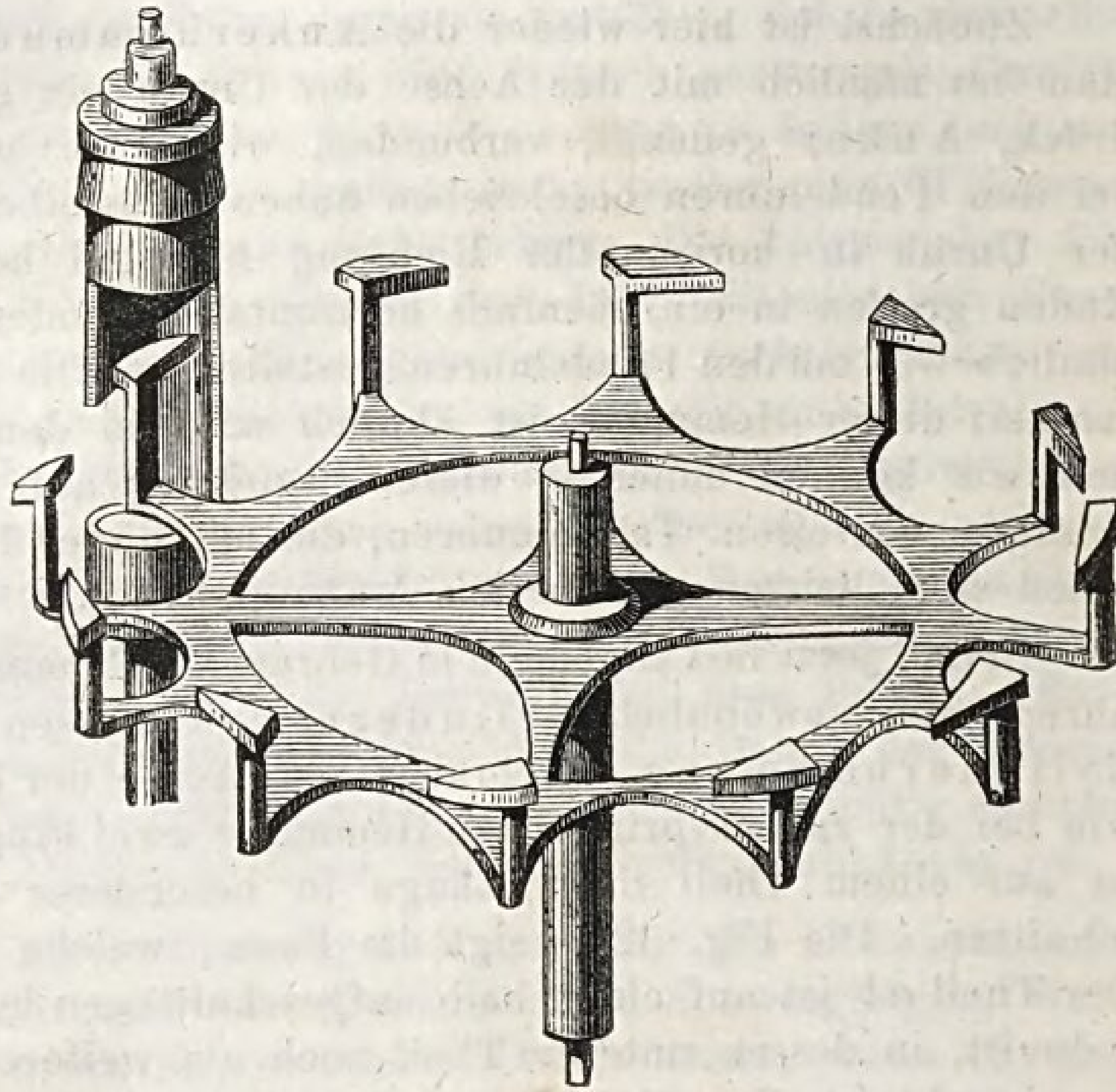


Fig. 326.

Während bei der soeben beschriebenen Hemmung ein Zahn durch eine der Oberflächen des Cylinders, der äusseren oder inneren, angehalten wird, sucht er diesen Cylinder auf keine Weise, weder in dem einen, noch in dem entgegengesetzten Sinn, zu drehen. Der Cylinder schwingt unter der alleinigen Einwirkung der Spirale. Dagegen sucht die Reibung des eben angehaltenen Zahnes an der Oberfläche des Cylinders, verbunden mit anderen Widerständen, welche die Bewegung der Unruh zu überwinden hat, die Amplitude der Oscillationen derselben fortwährend zu verringern, und die Uhr würde bald aufhören, zu gehen, wenn nicht der Motor von Zeit zu Zeit die Bewegung, welche durch diese Widerstände verloren geht, wieder ersetzen würde. Um diesen Zweck zu erreichen, gibt man den Zähnen des Steigrads an ihrer äusseren Seite die convexe Krümmung, wie sie aus den Figuren 327 und 328 zu ersehen ist. In dem Moment, wo der Zahn C, nachdem er über die äussere Oberfläche des Cylinders weggeglitten ist (Fig. 327), freigelassen wird, drückt er mit seiner convexen Fläche gegen den Rand D und beschleunigt so die Bewegung der Unruh. Der andere Rand E des Cylinders ist zu demselben Zweck schief abgeschnitten; wenn das vordere Ende des Zahns, nachdem dasselbe über die innere Fläche des Cy-

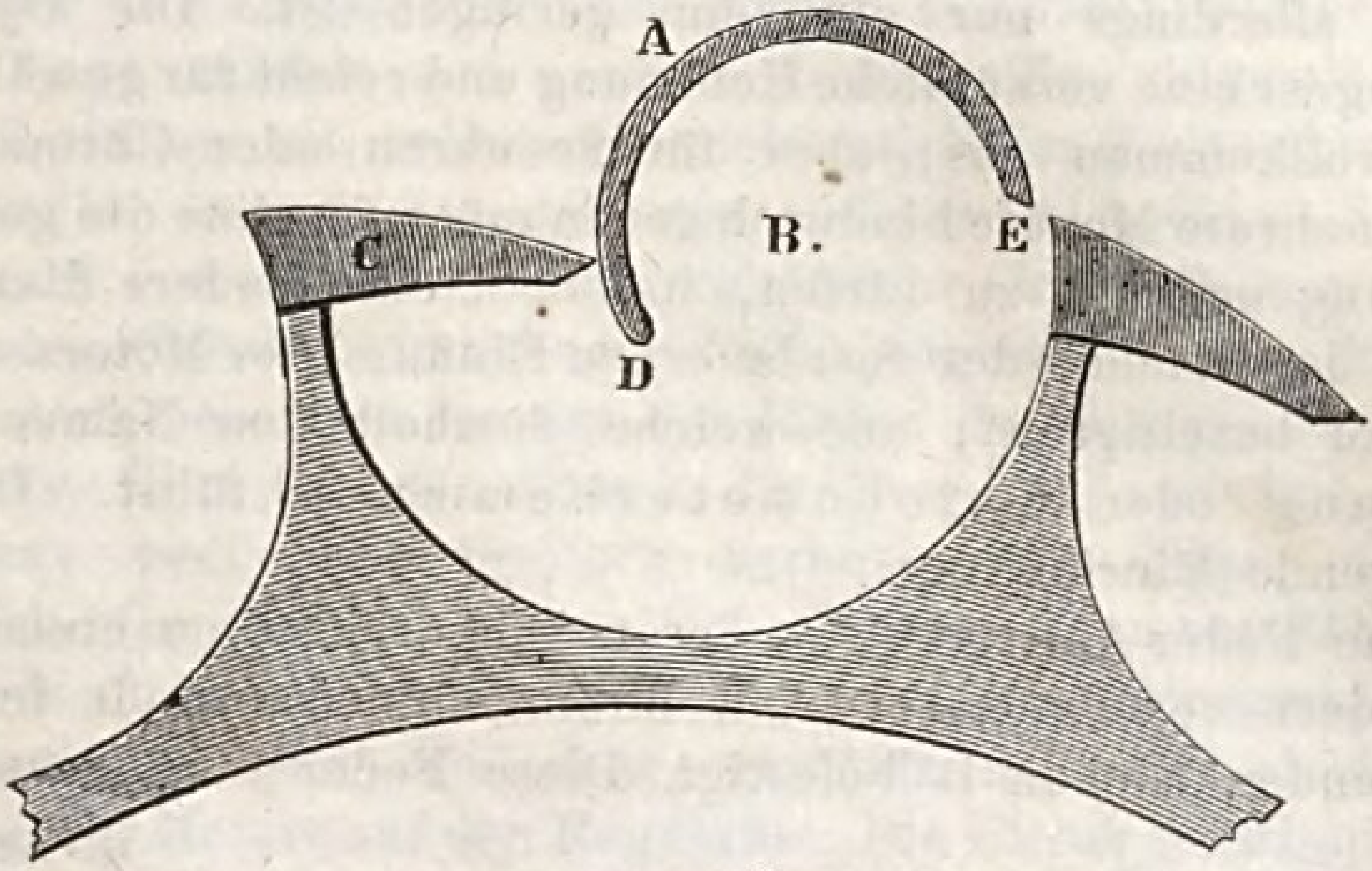


Fig. 327.

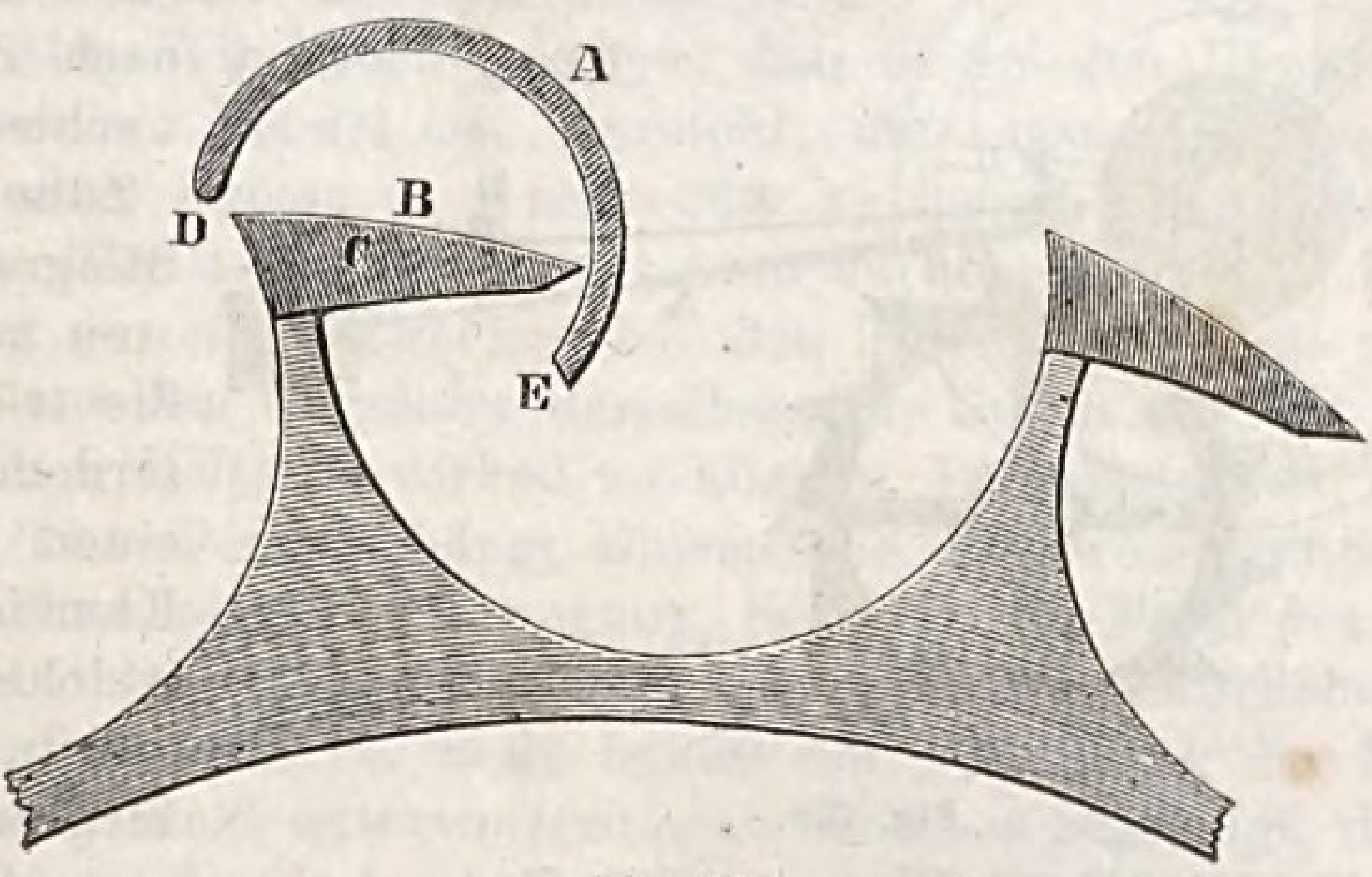


Fig. 328.

linders weggeglitten ist (Fig. 328), diesen Rand erreicht, so hat es noch über die kleine schiefe Ebene abzurutschen und ertheilt dadurch der Unruh einen zweiten Impuls in entgegengesetzter Richtung.

Die Cylinderhemmung ist in ihrer Wirkung der Ankerhemmung ganz ähnlich; sie ist für die Unruh das, was die Ankerhemmung für das Pendel ist; wie bei dieser bleibt der Zahn, so lange er in Berührung mit dem Cylinder ist, vollkommen ruhig. Man kann desshalb auch die Cylinderhemmung eine r u h e n d e H e m m u n g nennen. Ebenso ist aber auch, bei der Cylinder- wie bei der Ankerhemmung, der Regulator in Folge der Reibung der Zähne an der Oberfläche, durch welche sie arretirt werden, und in Folge des Impulses, welchen diese Zähne der Unruh ertheilen, fortwährend unter dem Einfluss des Motors, welcher

Einfluss allerdings nur ein sehr geringer ist. Die Cylinderhemmung ist eine vorzügliche Hemmung und reicht für gewöhnliche Uhren vollkommen aus; aber für Seeuhren oder Chronometer, welche mehrere Monate hindurch gehen müssen, ohne die geringste Aenderung erleiden zu dürfen, hat man eine andere Hemmung erdacht, in welcher der fortdauernde Einfluss des Motors auf den Regulator beseitigt ist, und welche desshalb den Namen freie Hemmung oder Chronometerhemmung führt. Dieselbe hat folgende Einrichtung:

Eine Feder A (Fig. 329), deren Dicke sich von einem Ende zum andern vermindert, ist mit ihrem dünneren Ende in einem feststehenden Kloben B befestigt. Diese Feder trägt einen Vorsprung C, gegen welchen nach und nach die verschiedenen Zähne des Steigrads stossen müssen. Sie trägt ausserdem noch einen kleinen Kloben D, in welchem eine zweite, sehr biegsame Feder E befestigt ist. Diese zweite Feder geht unter dem gekrümmten Ende eines am Ende der Feder A befindlichen Hakens F durch, sodass sie sich, ohne ein Hinderniss zu erfahren, nach abwärts biegen kann, während sie, wenn sie sich erhebt, den Haken mitnehmen und somit die Feder A gleichfalls aufwärts biegen muss. Die Achse G der Unruh ist mit einem Daumen *a* versehen, welcher zugleich mit ihr oscillirt und bei jeder Oscillation dem Ende der kleinen Feder E begegnet. Wenn diese Bewegung in der durch den Pfeil angezeigten Richtung stattfindet, so drückt der Daumen *a* im Vorbeigehen die kleine Feder E nieder, während die Feder A und mit ihr das Steigrad unbeweglich bleibt. Bei der entgegengesetzten Schwingung hebt der Daumen *a* die Feder E; diese erhebt wieder ihrerseits die Feder A, sodass der Zahn des Steigrads, welcher angehalten war, an dem Vorsprunge C vorbei gehen kann. Sobald aber der Daumen *a*

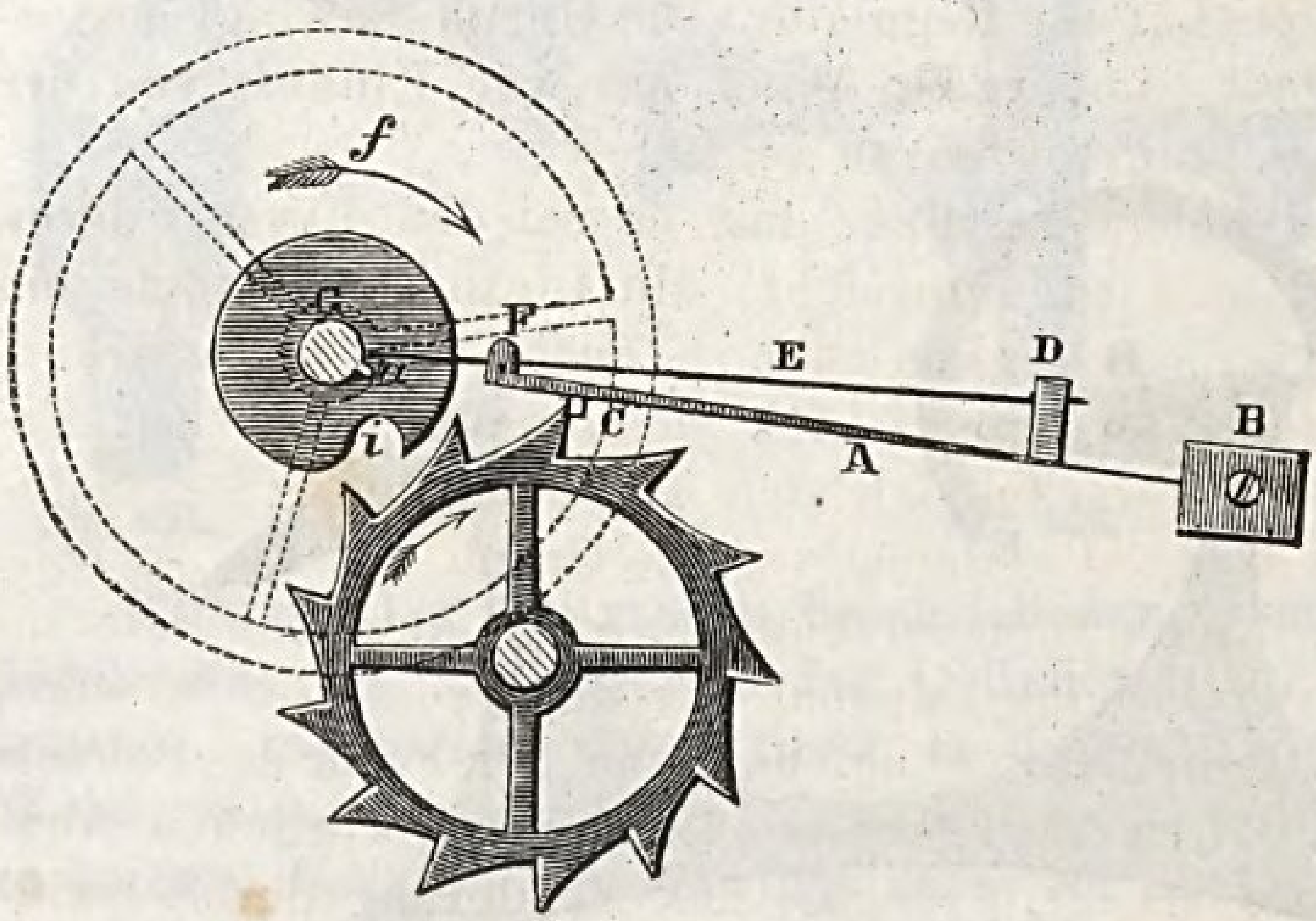


Fig. 329.

die Feder E verlässt, kehrt die Feder A alsbald wieder in ihre vorige Lage zurück und arretirt dadurch den folgenden Zahn. In der Zwischenzeit, während welcher sich das Steigrad um einen Zahn weiter bewegt hat, gibt ein anderer Zahn dieses Steigrads dem Rand *i* eines Einschnitts, welcher in einer kleinen, auf der Achse der Unruh befestigten Scheibe angebracht ist, einen Anstoss. Auf diese Art ersetzt der Motor durch eine fast augenblickliche Wirkung der Unruh die Bewegung wieder, welche sie durch zwei Schwingungen verloren hat. Diese Anstösse, welche die Unruh nach je zwei Schwingungen von den Zähnen des Steigrads erhält und erhalten muss, wenn ihre Bewegung längere Zeit fortdauern soll, sind aber, wie man sieht, die einzige Einwirkung des Motors auf den Regulator. Die Unruh schwingt ausserdem hin und her, ohne irgend einer Art von Einfluss von der Kraft des Motors unterworfen zu sein.

§. **218.** Wir haben gesehen, dass es bei den Uhren, deren Regulator ein Pendel ist, hinreicht, die Linse des Pendels um eine gewisse Grösse zu senken oder zu heben, um zu bewirken, dass die Uhr weder zu schnell noch zu langsam geht. Zur Erreichung desselben Zweckes bei den Taschenuhren ist es nothwendig auf den Regulator derselben, die Unruh mit der Spirale, in gleicher Weise einwirken zu können. Die Dauer der Schwingungen eines Pendels hängt allemal von der Grösse der Schwere, als der Ursache seiner Bewegung, und von der Form des Pendels selbst ab. Die Grösse der Schwere ist aber willkürlichen Aenderungen von unserer Seite behufs der Aenderung der Schwingungsdauer nicht unterworfen; man ist daher genöthigt, die Form des Pendels abzuändern, und dies geschieht eben, indem man seine Linse hebt oder senkt. Ebenso hängt die Dauer der Schwingungen einer Unruh von ihrer Form und von der Kraft der bewegenden Spirale ab. Aber wenn man diese Dauer abändern will, so ändert man, im Gegensatz zu dem Verfahren beim Pendel, die Kraft der Spirale und nicht die Form der Unruh. Zu diesem Behufe bringt man in der Nähe des festen Endes C der Spirale ein Stück A (Fig. 330) an, welches bei B einen Einschnitt besitzt. Durch diesen Einschnitt geht die Spirale etwas geklemmt hindurch, und wenn sie schwingt, so beginnt die Aenderung ihrer Gestalt erst bei dem Punkte B, sodass der Theil BC der Spirale als nicht vorhanden zu betrachten ist und der Vorgang ebenso stattfindet, als wenn sich die Spirale in B endigte. Das Stück A kann sich kreisförmig um die Achse der Unruh bewegen; man verändert seine Stellung, indem man den Zeiger D über dem

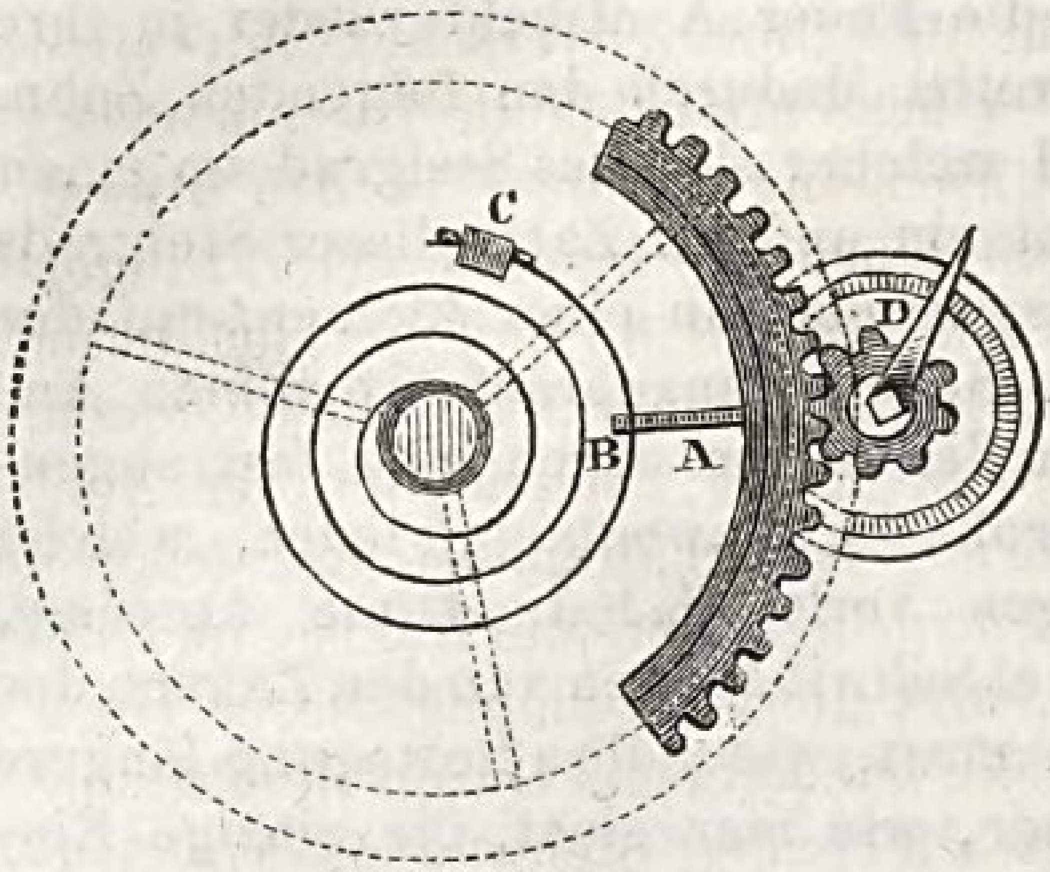


Fig. 330.

ihm beigegebenen kleinen Zifferblatt bewegt. Durch diese Bewegung kann man, je nachdem sie in dem einen oder entgegengesetzten Sinn geschieht, dieselbe Wirkung hervorbringen, als wenn man die Länge der Spirale vergrössern oder verringern würde. Durch diese Aenderung der Länge wird aber die Kraft der Spirale verändert, und es ist klar, dass man auf diese Weise die Unruh dahin bringen kann, Schwingungen von ganz bestimmter Dauer zu machen, oder anders ausgedrückt, dass man behufs der Regulirung den Gang der Uhr beliebig beschleunigen oder verzögern kann.

Durch Aenderungen der Temperatur werden Ausdehnungen oder Zusammenziehungen in den verschiedenen Theilen eines Pendels oder einer Unruh hervorgebracht; daraus folgen Aenderungen der Form, welche wiederum die Dauer der Schwingungen und somit den Gang der Pendel- oder Taschenuhren beeinflussen. Man begegnet diesem Uebelstande, indem man Pendel oder Unruhen aus Stoffen von ungleicher Ausdehnbarkeit construirt und dieselben so anordnet, dass sich ihre Ausdehnungen aufheben und keine Aenderungen der Schwingungsdauer daraus erfolgen. Man erhält so Compensations-Pendel oder -Unruhen, auf deren nähere Einrichtung wir jedoch nicht eingehen wollen.

§. 219. In allen Fällen, wo eine feststehende Uhr an einen Platz gestellt werden kann, wo man in vertikaler Richtung nicht im Raume beschränkt ist, wendet man als Motor derselben ein Gewicht an. Der Regulator ist dann immer ein Pendel.

Wenn dagegen eine feststehende Uhr nur sehr wenig Platz einnehmen soll, so ist es nicht mehr möglich, sich eines Gewichtes als Motor zu bedienen; man müsste ein solches wegen des geringen Raumes, den es durchlaufen könnte, sehr oft aufziehen. In diesem Falle wendet man daher eine Feder an, ohne ihr eine Schnecke beizugeben, da eine solche wegen der Vollkommenkeit des Regulators, der dann immer ein Pendel ist, überflüssig wird. Die Aenderungen in der Kraft der Feder beeinflussen auf keine bemerkenswerthe Weise die Dauer der Schwingungen dieses Regulators.

Die Feder als Motor und die Unruh, versehen mit einer Spirale, als Regulator, werden ausschliesslich in Taschenuhren, überhaupt in transportabeln Uhren angewendet. In den älteren dieser Uhren wendete man die zurückspringende oder Flügelhemmung an, wie man sie in Fig. 319 (S. 439) sieht. Bei dieser Hemmung musste man sich nothwendig einer Schnecke bedienen, um die Wirkung der bewegenden Feder, ungeachtet der Aenderungen ihrer Kraft, gleichförmig zu erhalten. In den neueren Uhren hat man statt der zurückspringenden die Anker- und die Cylinderhemmung angebracht, und die Anwendung dieser Hemmungen hat erlaubt, die Schnecke aufzugeben. Durch Beseitigung der Schnecke, sowie des vertikalstehenden Steigrads (s. Fig. 319) konnte zugleich die Dicke der Uhren bedeutend vermindert werden. Bei den transportabeln Uhren, denen man die möglichste Genauigkeit geben will, wendet man die freie Hemmung an und behält die Schnecke bei, um so viel als möglich die Ursachen der Aenderungen in der Dauer der Schwingungen zu vermeiden.

§. 220. Wenn man das bewegende Gewicht einer Uhr aufzieht, so nehmen die Zeiger, wie wir oben gesehen haben (§. 213), an der rückwärtigen Bewegung keinen Antheil. Aber sie bleiben während der ganzen Dauer des Aufziehens stehen und beginnen erst dann wieder weiter zu gehen, wenn dasselbe beendigt ist. Wenn also die Uhr auch ursprünglich richtig gegangen wäre, so müsste sie um die ganze Zeit zurückbleiben, während welcher sich die Zeiger nicht bewegen. Wenn aber die Uhren die Zeit sehr genau angeben sollen, wie diejenigen, welche zu astronomischen Zwecken dienen, so ist es von Wichtigkeit, diese Verzögerung zu vermeiden. Man erreicht dies durch Vorrichtungen, welche der Uhr gestatten, selbst während des Aufziehens fortzugehen. Eine der einfachsten dieser Vorrichtungen, welche am häufigsten angewandt wird, soll hier beschrieben werden

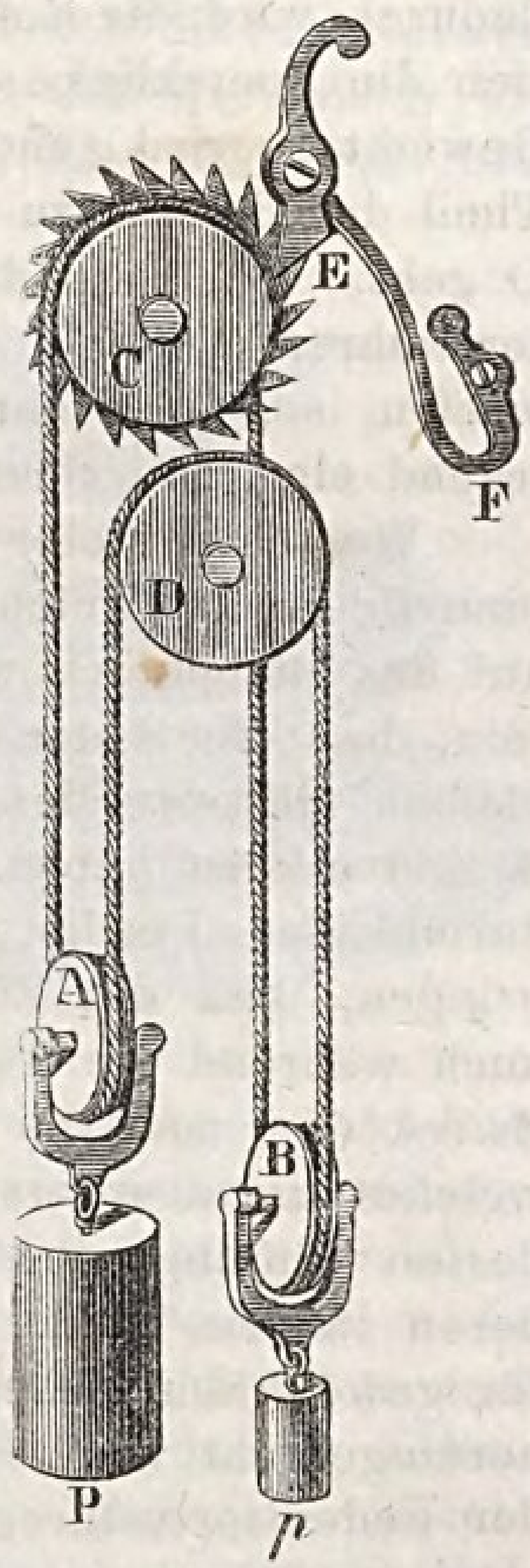


Fig. 331.

Zwei lose Rollen A und B (Fig. 331) werden durch eine Schnur ohne Ende, welche über die festen Rollen C und D geht, getragen. An diesen beiden losen Rollen sind

zwei Gewichte P und p aufgehängt. Das grössere von beiden, P, sucht die Schnur mit sich fortzuziehen, und da dafür gesorgt ist, dass dieselbe nicht über die Rollen C und D gleiten kann, so suchen sich diese beiden Rollen unter der Einwirkung des Gewichtes P zu drehen. Die Rolle C trägt auf der Seite ein Sperrrad, in dessen Zähne eine Sperrklinke E eingreift, welche durch eine Feder F fortwährend gegen das Rad gedrückt wird. In Folge der Richtung, welche die Zähne des Sperrrades haben, kann die Rolle C der Wirkung des Gewichtes nicht folgen. Die Rolle D ist an dem ersten der Zahnräder befestigt, aus denen das Werk der Uhr besteht. Sie wird durch das Gewicht P gedreht und veranlasst ihrerseits die Bewegung des übrigen Räderwerks. Das kleine Gewicht p hat blos den Zweck, die Schnur hinreichend zu spannen, damit sie nicht über die Rollen C und D gleitet; es steigt, während P fällt. Um die Uhr aufzuziehen, darf man nur an dem Theil der Schnur, welcher von der Rolle C zur Rolle B geht, von oben nach unten ziehen; dadurch wird die Rolle C in einer Richtung gedreht, bei welcher sich die Sperrklinke ihrer Bewegung nicht widersetzt, und das Gewicht P wird gehoben, ohne dass es aufhört, auf denjenigen Theil der Schnur zu wirken, welcher von der Rolle A zur Rolle D geht. Da somit die Rolle D der Wirkung des Gewichtes P fortwährend, selbst während des Aufziehens desselben, unterworfen ist, so dreht sie das Räderwerk und die Zeiger ohne irgend eine Unterbrechung.

Wenn der Motor einer feststehenden oder transportabeln Uhr eine Feder ist, welche direkt, ohne Vermittlung einer Schnecke, auf das Räderwerk wirkt, so kann auch hier die Anordnung so sein, dass die Räder und Zeiger während des Aufziehens stehen bleiben müssen. Dies ist so in Fig. 319 der Fall, wie wir es auf S. 439 erklärt haben. Aber man kann es auch in diesem Falle durch eine einfache Aenderung in der Anordnung leicht dahin bringen, dass das Räderwerk und die Zeiger immer fortgehen, auch während die Feder von Neuem gespannt wird. Zu diesem Zweck darf man die Feder nur in ein Federhaus einschliessen, welches mit dem ersten Rad des Uhrwerks verbunden, und an dessen Umfang das äussere Ende der Feder festgemacht ist, deren inneres Ende mit einer Achse in Verbindung steht, die für gewöhnlich stehen bleibt und nur beim Aufziehen der Feder herumgedreht wird. Man begreift, dass dabei das äussere Ende der Feder fortwährend auf den Umfang des Federhauses wirkt, ob diese Achse gar nicht berührt oder ob sie gedreht wird. Das

Federhaus und folglich auch das Rad, an welchem es befestigt ist, wird also ohne Unterbrechung herumgedreht und mit diesem die übrigen Räder des Uhrwerks. Auf diese Weise ist die Motorfeder bei den gewöhnlichen Taschenuhren von geringer Dicke angeordnet, in welchen die Anker- oder Cylinderhemmung die Weglassung der Schnecke gestattet. Es ist klar, dass dabei die Achse, an welcher das innere Ende der Motorfeder befestigt ist, ein Sperrrad tragen muss, welches ihr nur in der Richtung sich zu drehen gestattet, in welcher das Aufziehen geschieht.

Wenn die Motorfeder mittelst einer Schnecke wirkt, so geschieht das Aufziehen dadurch, dass man die Schnecke im entgegengesetzten Sinne von dem dreht, in welchem sie gewöhnlich von der Feder bewegt wird. Auf diese Art wickelt sich die Kette, welche die Wirkung der Feder ganz auf den Umfang des Federhauses aufgerollt hatte, von Neuem wieder auf die Schnecke auf; dadurch dreht sich das Federhaus, und indem es das äussere Ende der Feder mit fortzieht, rollt sich diese mehr und mehr um ihre Achse auf, sie wird gespannt. Damit sich die rückwärtige Bewegung, welche der Schnecke während des Aufziehens ertheilt wird, nicht auf das ganze Räderwerk überträgt, hat man wieder ein Sperrrad an ihr angebracht, mittelst dessen sie auf das erste Rad des Uhrwerks wirkt, wie man es in Fig. 333 sieht. Dieses Sperrrad liegt im Innern des Zahnrades, und eine Sperrklinke, welche ebenfalls darin Platz findet, greift in seine Zähne. In Fig. 332 wurden die Schnecke und das Zahnrad von einander entfernt gezeichnet, um die Anordnung besser sichtbar zu machen.

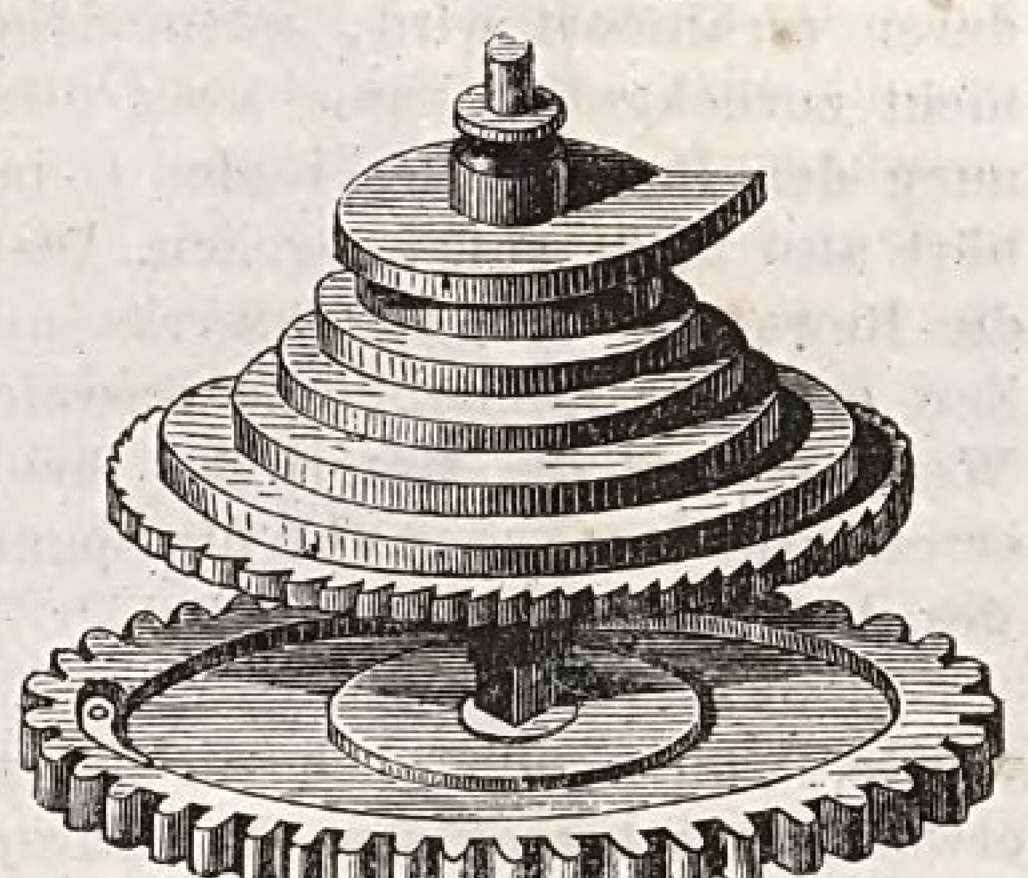


Fig. 332.

Sehen wir jetzt, wie man es auch hier dahin gebracht hat, dass die Bewegung der Uhr während des Aufziehens, wo die Kette auf die Schnecke aufgewickelt wird, fortdauert. Das Sperrrad A (Fig. 333), welches ein Stück mit der Schnecke ausmacht, wirkt nicht direkt auf das erste Rad des Räderwerks, sondern erst durch Vermittlung eines zweiten Sperrrads B, dessen Zähne nach entgegengesetzter Seite gekehrt sind. Wenn die Motorfeder die Kette spannt und die Schnecke dreht, so dreht sich



Fig. 333.

das Sperrrad A, welches mit letzterer zusammenhängt, im Sinne des Pfeiles *f*. Mittelst der Sperrklinke *m* dreht dieses Rad in demselben Sinne das Rad B, dessen Zähne nach und nach unter der Sperrklinke *n* weggehen, ohne von dieser aufgehalten zu sein. Eine Feder *abc* ist einestheils in *a* an dem Rade B, andererntheils in *c* an dem Rade C befestigt. Das Rad B, welches in der Weise, wie so eben beschrieben wurde, in Bewegung gesetzt wird, zieht an dem Ende *a* dieser Feder; diese spannt sich hiedurch und zieht nun ihrerseits an dem Rade C, um es in demselben Sinne herumzudrehen. Wenn man dagegen die Schnecke und folglich auch das Rad A, um die Uhr aufzuziehen, in entgegengesetztem Sinne, in dem des Pfeiles *f'*, dreht, so kann ihr das Rad B nicht folgen, da es durch den Sperrhaken *n* daran verhindert wird; indem daher das Ende *a* der Feder *abc* nicht zurückgehen kann, zieht diese Feder in Folge ihrer Spannung den Punkt *c* des Rades C im Sinne des Pfeiles *f*; die Uhr hört also nicht auf, zu gehen. Diese Feder *abc* muss also allein die Bewegung des Räderwerks und der Zeiger während einer Zeit erhalten können, die ausreicht, um die Uhr aufzuziehen. Wenn hierauf die Motorfeder ihre Wirkung wieder beginnt, so ersetzt sie der Feder *abc* die Spannung wieder, die sie während des Aufziehens verloren hat.

§. 221. Zum Schlusse dessen, was über die Uhren gesagt wurde, wollen wir noch die Einrichtung eines Schlagwerks etwas näher betrachten, d. h. desjenigen Mechanismus, welcher die Stunden und Theile von Stunden in dem Augenblick schlägt, wo sie die Zeiger auf dem Zifferblatt angeben. Fig. 334 zeigt die Einrichtung des Schlagwerks einer feststehenden Uhr, deren Motor ein Gewicht ist. Das Schlagwerk hat einen besonderen Motor, gleichfalls ein Gewicht, welches an dem Ende der Schnur A befestigt ist. Diese Schnur schlingt sich um einen Cylinder B, und die Bewegung, welche das Gewicht demselben zu geben sucht, überträgt sich auf das Rad C, welches an derselben Welle befestigt ist. Das Rad C greift in das Trieb D und dreht so ein zweites Rad E; das Rad E, indem es auf das Trieb F wirkt,

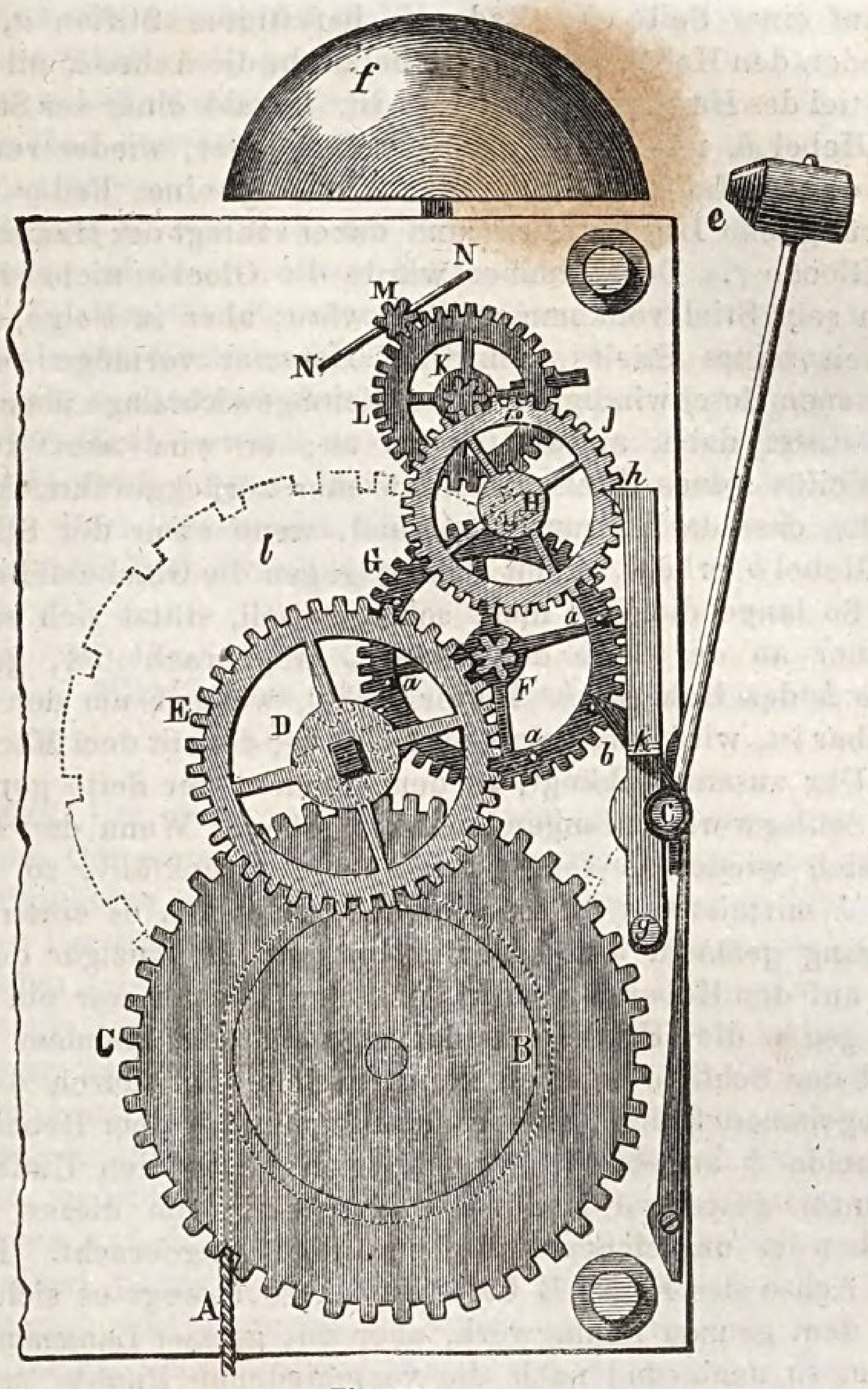


Fig. 334.

dreht ein drittes Rad G. Dieses überträgt seine Bewegung auf das Trieb H und folglich auf ein viertes Rad J. Das Rad J überträgt seine Bewegung auf ein Trieb K und ein fünftes Rad L; das Rad L endlich dreht das Trieb M, dessen Achse zwei Flügel N, N trägt, welche, indem sie sich sehr schnell herumdrehen, mittelst des Widerstandes der Luft den Gang des Schlagwerks reguliren (s. §. 209). Während sich das ganze Räderwerk unter der Wirkung des bewegenden Gewichtes dreht, erheben

die auf einer Seite des Rades G befestigten Stiften *a*, *a* nacheinander den Hebel *b*; dieser Hebel dreht die Achse *c*, an welcher der Stiel des Hammers *e* befestigt ist. Sobald einer der Stiften *a*, *a* den Hebel *b*, nachdem er ihn erhoben hatte, wieder verlässt, so fällt dieser Hebel in Folge der Wirkung einer Feder in seine ursprüngliche Lage zurück, und dabei schlägt der Hammer gegen die Glocke *f*. Der Hammer würde die Glocke nicht berühren, wenn sein Stiel vollkommen steif wäre; aber in Folge der Biegsamkeit seines Stieles kann der Hammer vermöge seiner gewonnenen Geschwindigkeit seine Gleichgewichtslage überschreiten und stösst dabei an die Glocke an; er wird aber durch die Elasticität seines Stiels alsbald wieder zurückgeführt. Man sieht daraus, dass der Hammer jedesmal, wenn einer der Stiften *a*, *a* den Hebel *b* erhebt, einen Schlag gegen die Glocke führen muss.

So lange die Uhr nicht schlagen soll, stützt sich ein Stift *i* welcher an der Seite des Rades J angebracht ist, gegen das Ende *h* des Hebels *gh*. Dieser Hebel, welcher um den Punkt *g* drehbar ist, wird durch eine Vorrichtung, die mit dem Mechanismus der Uhr zusammenhängt, in dem Moment zur Seite gerückt, wo das Schlagwerk anfangen soll zu gehen. Wenn der Hebel *gh* sogleich wieder in seine vorige Lage zurückfällt, so wird das Rad J mittelst des Stiftes *i* arretirt, nachdem es einen einzigen Umgang gemacht hat; alsdann hat nur ein einziger der Stiften *a*, *a* auf den Hebel *b* gewirkt, und der Hammer nur ein einzigesmal gegen die Glocke geschlagen. Damit der Hammer diejenige Zahl der Schläge machen kann, welche der durch den Zeiger angegebenen Stunde entspricht, hat man an dem Hebel *gh* eine Schneide *k* angebracht, welche sich gegen den Umfang eines dahinter gestellten Rades *l* stützt; rings um dieses Rad sind Kerben in ungleichen Zwischenräumen angebracht. Da es auf der Achse des Rades E befestigt ist, so bewegt es sich zugleich mit dem ganzen Schlagwerk, aber mit grosser Langsamkeit, und bietet so nach und nach die verschiedenen Punkte seines Umfangs der Schneide *k* dar. Wenn die Schneide *k* in einer Kerbe liegt, so arretirt das Ende *h* des Hebels *gh* mittelst des Stiftes *i* das Rad J und damit das ganze Schlagwerk. Aber wenn sich die Schneide *k*, nachdem der Hebel *gh* durch das Uhrwerk zur Seite gerückt worden ist, gegen einen Theil des Umfangs des Rades *l* stützt, der zwischen zwei Kerben liegt, so bleibt das Schlagwerk so lange ausgelöst, als dies der Fall ist, d. h. so lange, bis das Rad *l*, welches sich mit dem Schlagwerk bewegt, der Schneide *k* die folgende Kerbe darbietet. Es ist folglich

klar, dass die Anzahl der Schläge, welche der Hammer gegen die Glocke führen soll, genau von der Grösse des Zwischenraumes zwischen zwei Kerben abhängt, auf welchem die Schneide *k* schleift.

Das Rad *l*, welches sich jedesmal, wenn das Schlagwerk in Bewegung ist, nur um eine kleine Grösse dreht, muss in dem Zeitraum von 12 Stunden, der Zeitperiode, nach deren Verfluss die Stunden wieder dieselben Namen erhalten, einen Umgang machen. In derselben Zeit muss sich das Rad J so oftmal herumdrehen, als der Hammer Schläge auf die Glocke zu machen hat, also 78mal, wenn nur die ganzen Stunden geschlagen werden sollen, und 90mal, wenn ausserdem auch noch zu jeder halben Stunde ein Schlag gemacht werden soll. Daraus ergeben sich leicht die Verhältnisse der Zähnezahlen der Räder und Triebe zwischen dem Rad E und dem Rad J.

XI. Einiges über den Transport von Lasten.

§. 222. Um einen schweren Körper auf horizontalem Wege von einem Ort zum andern zu transportiren, muss eine gewisse Kraft aufgeboten werden, welche für den nämlichen Körper, je nach den Umständen, unter denen dieser Transport erfolgt, sehr verschieden sein kann. Mit der Anwendung dieser Kraft findet zugleich die Leistung einer gewissen Quantität von Arbeit statt. Aber wenn man über die Verhältnisse, unter welchen die Fortschaffung einer Last auf horizontalem Wege erfolgt, näher nachdenkt, so erkennt man leicht, dass es nicht eigentlich der Transport selbst ist, welcher jene Arbeitsleistung nothwendig macht. Wenn der Körper auf dem Boden gleiten oder rollen könnte, ohne irgend einen passiven Widerstand zu erfahren, der in solchen Fällen immer vorhanden ist, so würde es hinreichen, ihm einen beliebig schwachen Anstoss zu geben, um ihn sofort in Bewegung zu setzen; und da keine Ursache seine Bewegung zu verzögern suchen würde, so würde der Körper die einmal gewonnene Geschwindigkeit bis ins Unendliche fort behalten und müsste, nachdem er an dem Ort, wohin er geschafft werden sollte, angekommen ist, erst angehalten werden. Der Transport würde also geschehen können, ohne dass eine andere Bewegungsarbeit geleistet werden müsste, als diejenige, welche anfänglich nothwendig ist, dem Körper eine bestimmte Geschwindigkeit zu ertheilen; und selbst diese Bewegungsarbeit, welche beliebig klein

genommen werden könnte, würde immer noch eine gleich grosse Menge von Nutzarbeit in dem Moment hervorbringen, wo der Körper angehalten würde.

Die passiven Widerstände, welche bei dem Transport eines schweren Körpers auf horizontaler Bahn auftreten, sind also die einzigen Widerstände, welche man bei diesem Transport zu überwinden hat. Sie allein machen es nothwendig, eine fortwährend oder doch nahezu fortwährend wirkende Kraft anzuwenden, wenn der Körper einen nur einigermaassen grösseren Weg zurücklegen soll. Man begreift demnach, woher es kommt, dass man durch geeignete Transportmittel die Zugkraft, welche sehr grosse Lasten fortzubewegen hat, auf eine verhältnissmässig geringe Grösse reduciren kann. Wir gehen nun daran, die verschiedenen Arten des Transports von Lasten auf ganz oder doch nahezu horizontalem Wege durchzugehen, und werden dabei vorzüglich die Widerstände, welche bei ihrer Anwendung auftreten, ins Auge fassen.

§. 223. **Direkter Transport durch Menschen oder Thiere.** — Wenn ein Mensch eine Last trägt, sei es in seinen Händen oder auf dem Rücken oder auf irgend eine andere Art, so reduciren sich die passiven Widerstände, welche sich bei seiner Fortbewegung entwickeln, auf den Widerstand der Luft; da aber bei dieser Bewegung die Geschwindigkeit niemals sehr gross ist, so ist dieser Widerstand meistens zu vernachlässigen. Die durch den Menschen auszuübende Zugkraft, d. h. die Kraft, welche er im Sinn der Bewegung in horizontaler Richtung an der Last aufzubieten hat, ist also eigentlich Null oder doch sehr nahe gleich Null. Aber die Operation des Transports ist von einer Anspannung der Muskeln, welche zum Tragen der Last dienen, begleitet, eine Anspannung, welche den Menschen ermüdet und welche ihn selbst dann ermüden würde, wenn er in Ruhe bliebe. Ausserdem wirkt die Bewegung der Beine während des Gehens ermüdend auf die Muskeln ein, durch welche diese Bewegung bewerkstelligt wird. Endlich findet beim Gehen eine fortwährende Hebung und Senkung des gemeinschaftlichen Schwerpunkts des Körpers und der Last, welche getragen wird, statt, und es ist klar, dass Ersteres, das Heben, eine gewisse Arbeitsleistung in Anspruch nimmt. Aus diesen verschiedenen Ursachen ist der direkte Transport einer Last durch einen Menschen sehr beschwerlich, sodass man nur da seine Zuflucht zu ihm nehmen sollte, wo das Gewicht der fortzuschaffenden Last nicht zu gross, oder wo die zurückzulegenden Entfernungen nur klein sind.

Der Transport auf dem Rücken von Thieren gibt zu ähnlichen Betrachtungen Anlass.

§. 224. **Transport durch Gleiten.** — Wenn ein schwerer Körper transportirt werden soll, ohne durch Menschen oder Thiere getragen zu werden, so muss er sich entweder direkt oder durch Vermittlung einer Vorrichtung, welche zu seinem Transport dient, auf den Boden stützen. Der Druck, welchen er in diesem Fall in seinen Unterstützungspunkten gegen den Boden ausübt, bringt Widerstände hervor, welche sich im Verein mit dem Widerstande der Luft seiner Bewegung entgegensetzen. Wenn der Körper direkt auf dem Boden ruht und man bewegt ihn vorwärts, indem man ihn über denselben weggleiten macht, so entwickelt sich eine Reibung, die unter Umständen sehr bedeutend sein kann. Diese Art des Transports wird z. B. angewendet, wenn man lange Stücke Holz, ganze Bäume, durch Pferde oder Ochsen mittelst Ketten fortziehen lässt, die man an ihrem einen Ende befestigt hat.

Bei dieser Art des Transports ändert sich natürlich der Widerstand mit der Natur der Oberflächen, welche aufeinander gleiten. Um diesen Widerstand zu vermindern, wird man daher die sich berührenden Oberflächen aus Stoffen bilden, die leicht aufeinander gleiten. Man wird sie möglichst glatt machen und Schmiermittel dazwischen bringen, welche, indem sie sich auf den Flächen ausbreiten, die Grösse der Reibung vermindern. Die Schleifen und Schlitten, deren wir uns im Winter zum Transport bedienen (Fig. 335), sind unten mit Eisenbändern beschlagen, um sie leichter über das Eis und den Schnee gleiten zu machen. Ebenso sind die Schlittschuhe nichts anderes als Eisenstreifen, welche man unter den Füssen anbringt, und welche den Zweck

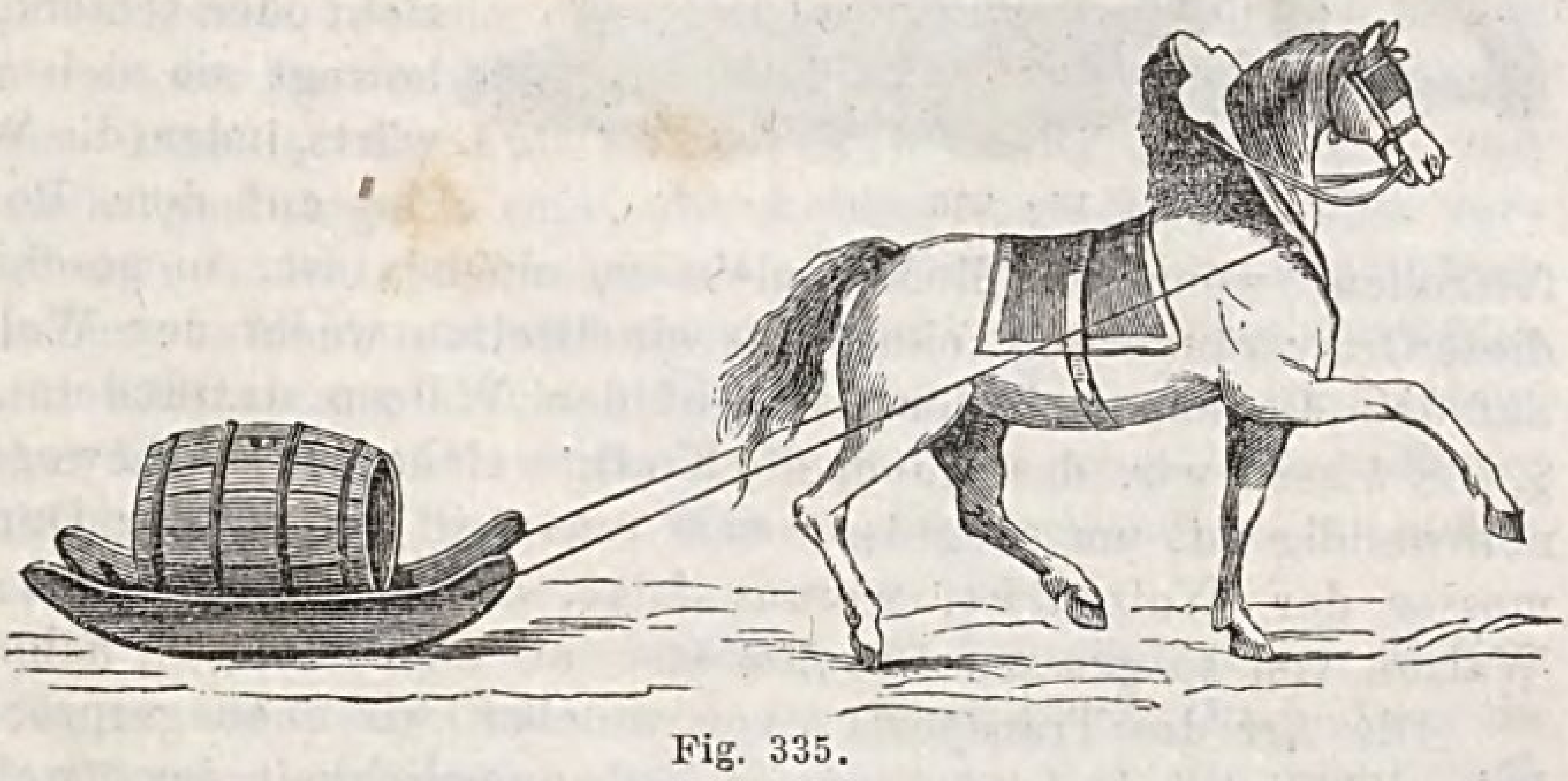


Fig. 335.

haben, den Widerstand, der sich während des Gleitens entwickelt, möglichst klein zu machen.

§. 225. **Transport durch Wälzen.** — Wenn es die Form eines Körpers gestattet, ihn auf dem Boden fortzurollen, so benützt man dies für den Transport; der Widerstand, den man in diesem Fall zu überwinden hat, ist im Allgemeinen viel geringer als derjenige, welchen man beim Gleiten erfährt. So erzählt *Vitruv*, dass dieses Mittel von *Ctesiphon*, dem Erbauer des prächtigen Tempels der Diana zu Ephesus, angewandt wurde, um Säulenschäfte zu transportiren, die 250000 Kilogramm schwer waren; er versah sie zu diesem Zweck mit einem Holzrahmen, welcher dazu gehörte, eine Zugkraft auf ähnliche Art an ihnen anzubringen, wie dies bei den Walzen, deren man sich in der Landwirthschaft bedient, geschieht. Auf dieselbe Art des Transports kann man leicht die schwersten Fässer, wenigstens auf kurze Entfernungen, fortbewegen, indem man sie durch einen Druck, den man gegen sie ausübt, vor sich herrollt.

Es ist selten, dass sich die Gestalt einer Last zu dieser Art des Transports eignet; aber man kann, wo es nicht der Fall ist, in vielen Fällen das Gleiten durch ein Rollen ersetzen. Wenn die Last eine ebene Fläche von etwas grosser Ausdehnung darbietet, so lässt man sie mit dieser Fläche auf zwei Walzen von Holz aufruhen (Fig. 336), die in gewisser Entfernung von einander, rechtwinkelig zur Richtung der hervorzubringenden Bewegung auf dem Boden ruhen. Wenn man an der Last zieht oder schiebt, so bewegt sie sich vorwärts, indem die Walzen auf dem Boden fortrollen; wenn der Boden nicht zu uneben ist, so geschieht diese Ortsveränderung, ohne dass ein Gleiten weder der Walzen auf dem Boden, noch der Last auf den Walzen stattfindet. Aus §. 168 wissen wir, dass dabei die Kraft, welche zur Fortbewegung nothwendig ist, um so grösser sein muss, je kleiner der Durchmesser der Walzen ist, woraus folgt, dass es vortheilhaft ist, Walzen von so grossem Durchmesser, als man kann, zu nehmen.

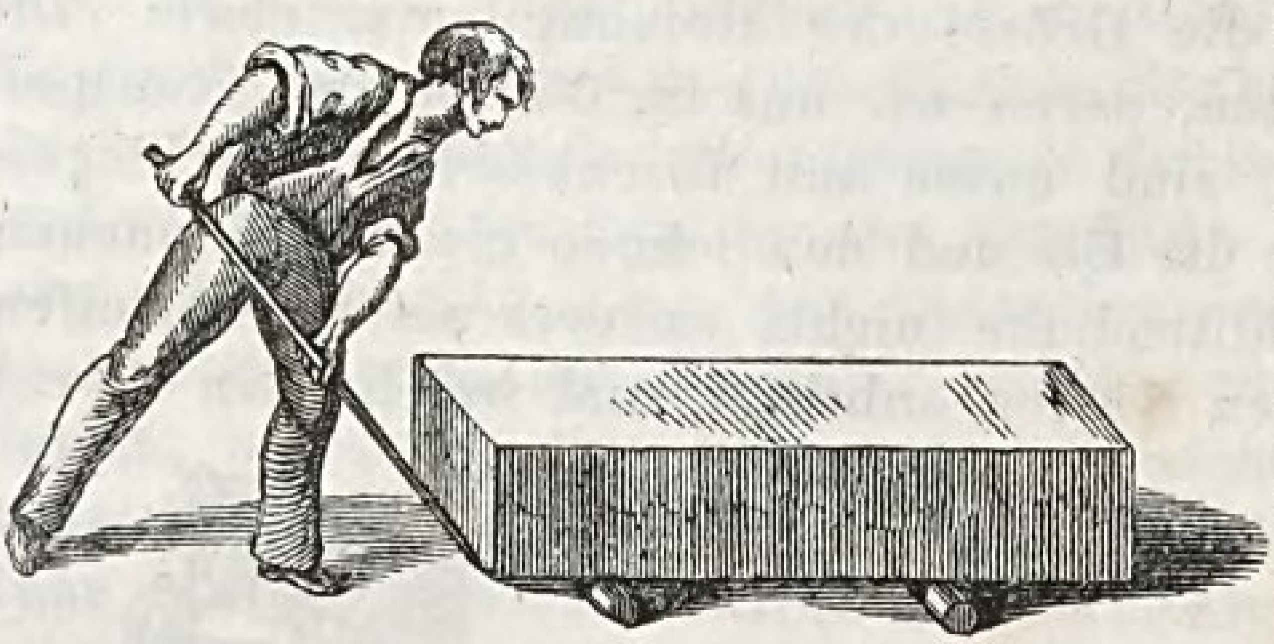


Fig. 336.

Die Art des Transports, von welcher wir eben gesprochen haben, bietet jedoch eine grosse Unbequemlichkeit dar, welche

veranlasst, dass man nur dann seine Zuflucht zu ihr nimmt, wenn die zurückzulegenden Entfernungen nur klein sind. Diese Unbequemlichkeit besteht darin, dass sich die Walzen minder schnell als die Last fortbewegen. Wenn man den Vorgang während der Bewegung näher betrachtet, so sieht man, dass zwar jede Walze auf dem Boden in derselben Richtung fortrollt, in welcher die Last sich bewegt, dass sie aber die letztere nicht immer in denselben Punkten berührt; sie rollt unter der Last im entgegengesetzten Sinne als auf dem Boden, und daher kommt es, dass sie nach und nach von der Last in Punkten berührt wird, die von dem vorderen Ende derselben mehr und mehr entfernt sind. Man sieht leicht, dass in der Zeit, in welcher die Walze, indem sie auf dem Boden fortrollt, eine Umdrehung macht, in welcher sie also um ein Stück Wegs gleich ihrem Umfang fortschreitet, die Last um die doppelte Länge fortbewegt wird. Die Geschwindigkeit, mit welcher die Walzen auf dem Boden fortrollen, ist nur halb so gross als die der Last. Daraus folgt, dass schon nach einer Ortsveränderung von geringer Ausdehnung die eine der beiden Walzen an's hintere Ende der Last zu stehen kommen muss, sodass sie bei fernerer Bewegung den Körper nicht mehr zu stützen vermag. Man ist also genöthigt, sie wieder unter das vordere Ende der Last zu bringen. Um die Drehungsbewegung des Körpers in dem Moment, wo er beginnt sich blos auf die vordere Walze zu stützen, zu verhindern, thut man gut, eine dritte Walze vorne unter die Last zu bringen, bevor noch die hintere Walze aufhört zu wirken.

§. 226. **Transport auf Rädern.** — Um die Unbequemlichkeiten, welche wir eben bei dem Transport mittelst Walzen bezeichnet haben, zu vermeiden, darf man dieselben nur durch Stücke ersetzen, welche während ihres Fortrollens auf dem Boden immer mit der Last verbunden bleiben und dieser in ihrer Bewegung folgen. Dies ist der Fall bei der Anwendung der Räder, und um nicht genöthigt zu sein, die Achsen derselben an den verschiedenen Lasten, welche man fortzuschaffen haben kann, festzumachen, bedient man sich eines Gestells, an welchem die Räder ein für allemal angebracht sind und auf welches die Last gelegt werden kann. So erhält man die Wägen von verschiedener Form, welche dazu dienen, Reisende, Waaren, Baumaterialien, mit einem Wort alle Arten von Lasten zu transportiren.

Bei dem Transport auf Rädern findet allemal ein Rollen des Rades auf dem Boden und ein Gleiten der Radachsen in ihren Büchsen statt; die gleitende Reibung ist also nicht voll-

ständig vermieden wie bei der Anwendung von Walzen, aber der Einfluss dieser Reibung ist um so schwächer, je grösser das Verhältniss des Durchmessers des ganzen Rades zum Durchmesser seiner Achse ist; denn je grösser dieses Verhältniss ist, desto geringer ist die Ortsveränderung des Angriffspunktes der Reibung für einen und denselben von dem Wagen durchlaufenen Weg, desto geringer ist also die Widerstandsarbeit, welche durch diese Reibung veranlasst wird. Die Vergrösserung des Raddurchmessers bietet aber noch einen andern Vortheil: je grösser dieser Durchmesser nämlich ist, desto kleiner muss die an dem Mittelpunkt des Rades, d. h. die an dem Gestell anzubringende Zugkraft sein, die den Widerstand des Rollens zu überwinden hat (§. 168).

Der Transport auf einem Schubkarren, wie er auf Seite 122 abgebildet ist, ist eine Vereinigung des direkten Transports, von dem wir im §. 223 gesprochen haben, und des Transports auf Rädern. In der That zerlegt sich das Gewicht des Karrens und der Last, welche er enthält, in zwei Theile, von denen der eine durch das Rad, der andere von dem Manne getragen wird, welcher die Handhaben des Karrens hält; dieser Mann hat also allemal den letzteren Theil des Gewichtes zu tragen und zugleich den Schubkarren horizontal fortzuschieben, um die Widerstände zu überwinden, welche der erste Theil veranlasst. Durch zweckmässige Construktion des Karrens kann allerdings der Theil der Last, welcher auf den Mann trifft, sehr klein gemacht werden, wie dies auch schon in §. 68 näher erläutert worden ist.

Wenn man sich eines Wagens bedient, der mit zwei Rädern versehen ist, die sich um die Enden einer und derselben Achse drehen, so zerlegt sich das Gewicht des Gestells mit allem, was darauf liegt, gleichfalls in zwei Theile, von denen der eine durch die beiden Räder, der andere durch den Menschen oder das Thier getragen wird, welche an der Deichsel wirken. Ein wesentlicher Unterschied zwischen einem solchen Wagen und dem Schubkarren besteht jedoch darin, dass man gewöhnlich die Ladung, welche ersterer zu tragen hat, so anbringt, dass ihr Schwerpunkt fast in der Vertikalebene gelegen ist, welche durch die Radachsen geht. Der Mensch oder das Thier, welche, um den Wagen fortzubewegen, in horizontaler Richtung an demselben ziehen, haben auf diese Weise nur wenig in vertikaler Richtung auf die Deichsel zu wirken, um das Gestell in passender Lage zu erhalten.

Wenn man endlich einen vierräderigen Wagen anwendet, so ist der gemeinschaftliche Schwerpunkt des Gestells und der Ladung immer so gelegen, dass die Vertikale, welche von ihm

herabgefällt wird, durch das Innere des Vierecks geht, welches durch die Unterstützungspunkte der vier Räder auf dem Boden gebildet wird. Man hat desshalb nicht mehr nothwendig, eine vertikale Kraft aufzubieten, um das Gestell in horizontaler Lage zu erhalten; es reicht hin, an dem Wagen im Sinn der Bewegung zu ziehen, welche man hervorbringen will, und dadurch die Widerstände zu überwinden, welche durch das Rollen der Räder auf dem Boden, durch das Gleiten der Achsen in ihren Büchsen und durch die Luft hervorgebracht werden, welcher der Wagen in seiner Bewegung begegnet.

§. 227. **Standfestigkeit der Wägen.** — Nach dem, was wir oben gesehen haben, muss man den Rädern eines Wagens möglichst grosse Dimensionen geben, um die Wirkung des Widerstandes des Rollens sowie des Reibens so viel als möglich zu vermindern. Wenn dies aber geschieht, so wird sich gewöhnlich die Ladung in ziemlicher Höhe über dem Boden befinden, wodurch die Standfestigkeit des Wagens sehr beeinträchtigt wird (§. 71). Er wird mehr geneigt sein umzufallen, wenn sich ihm auf seinem Wege Unebenheiten des Bodens darbieten.

Wenn ein Wagen auf einer Seite einer in der Mitte stark erhöhten Strasse fährt und sich in Folge dessen neigt, so ist die Geschwindigkeit, welche er besitzt, von bedeutendem Einfluss auf seine Stabilität. Während er sich bewegt, neigt sich der Wagen bald mehr bald weniger in unregelmässiger Weise, je nach der Beschaffenheit des Bodens, auf welchem er sich eben befindet. Um näher zu untersuchen, was in diesem Fall vor sich geht, können wir uns denken, dass der Wagen zwei verschiedene Bewegungen zu gleicher Zeit besitzt: nämlich erstens seine fortschreitende Bewegung in der Richtung des Weges, welchen er zurückzulegen hat, und zweitens eine drehende Bewegung um die horizontale Tangente, welche in dem Punkt A (Fig. 337) an das tiefer stehende Rad gelegt wird. In Folge dieser zweiten Bewegung beschreibt der Schwerpunkt G einen Kreisbogen, dessen Mittelpunkt auf der eben besprochenen Tangente liegt. In diesem Bogen bewegt er sich bald auf- bald abwärts; damit der Wagen aber nicht umfällt, darf der Punkt G niemals den höchsten Punkt B dieses Kreisbogens überschreiten; denn sonst dreht die Schwerkraft, welche ohne Aufhören auf den Wagen wirkt, ihn um die im Punkte A an das Rad gezogene Tangente und wirft ihn um. In dem Augenblick, wo das linke Rad einem Vorsprung auf dem Wege begegnet, der es zwingt, sich zu erheben, steigt der Schwerpunkt in

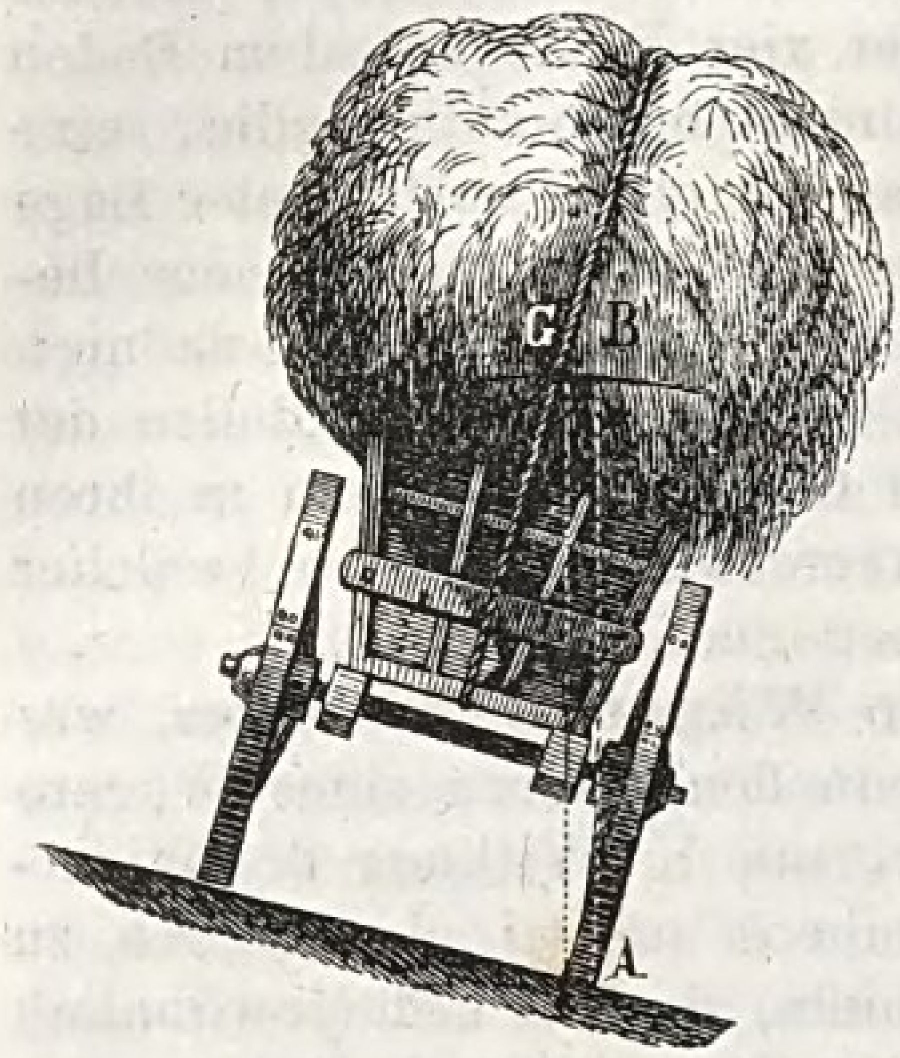


Fig. 337.

dem Kreisbogen, welchen er beschreiben muss. Wenn der Wagen langsam geht, so hält die Schwerkraft das linke Rad so lange in Berührung mit dem Boden, als der Schwerpunkt den Punkt B noch nicht überschritten hat. Aber wenn der Wagen schnell fährt, so zwingen die Erhöhungen, welchen das linke Rad begegnet, den Wagen, sich plötzlich auf der linken Seite zu erheben; der Schwerpunkt wird, so zu sagen, in seinem Kreisbogen von unten nach oben geschleudert, und in Folge der Geschwindigkeit, welche der Wagen dadurch um die durch A gehende Tangente als Achse erhält, kommt das linke Rad ausser Berührung mit dem Boden; dabei ist es möglich, dass der Schwerpunkt bis zu dem Punkt B ansteigt, bevor die Schwerkraft seine aufsteigende Bewegung vernichten konnte. Man begreift daraus, dass ein schnellfahrender Wagen auf einem seitwärts geneigten Wege umgeworfen werden kann, dessen Neigung dazu nicht ausgereicht haben würde, wenn er langsam gefahren wäre.

Es ist nicht schwer einzusehen, dass diejenigen Wägen, welche in Federn hängen, leichter umgeworfen werden als die ohne Federn. Die Aufhängefedern sind bekanntlich dazu bestimmt, die Stösse, welche der Wagen in Folge der Unebenheiten des Wegs empfängt, zu mildern. Diese Stösse werden zunächst den Rädern und den Stücken ertheilt, welche an den Achsen derselben befestiget sind. Auf den übrigen Theil des Wagens übertragen sie sich erst mittelst der Federn, welche ihre Wirkung verkleinern, indem sie sich mehr oder weniger biegen. Wenn der Weg Ungleichheiten darbietet, in Folge deren sich der Wagen von einer Seite auf die andere neigt, so neigt sich dabei der Kasten des Wagens nicht ganz so, als wenn er ohne Vermittlung der Federn an dem Gestell befestigt wäre. Wenn z. B. ein Rad durch eine Erhöhung des Bodens plötzlich gehoben wird, so folgt der Kasten des Wagens nicht augenblicklich dieser Bewegung; die Federn biegen sich erst und in Folge dessen nähert sich, so zu sagen, das Rad dem Wagenkasten. Gleich darauf treten nun die Federn, welche dadurch mehr als

gewöhnlich gespannt wurden, in Wirksamkeit und veranlassen nun erst den Wagen, diejenige Neigung anzunehmen, welche er ohne ihre Gegenwart schon gleich ursprünglich plötzlich angenommen haben würde. Aber der Körper des Wagens hält in dem Moment, wo die Federn ihre ursprüngliche Gleichgewichtsgestalt wieder angenommen haben, in seiner Bewegung nicht plötzlich inne; er besitzt in diesem Augenblicke eine bestimmte Geschwindigkeit, welche ihn veranlasst, sich noch mehr zur Seite zu neigen, und die Federn zwingt, sich im entgegengesetzten Sinne zu biegen. Daraus folgt, dass sich der Wagen im Ganzen stärker neigt, als wenn er nicht in Federn hinge, und er kann an Stellen umfallen, wo dies ohne Federn nicht geschehen wäre.

Aus dem Vorhergehenden ist leicht zu schliessen, dass die für den Transport der Reisenden auf den Strassen angewandten Diligencen, unter dem Gesichtspunkte der Stabilität betrachtet, eine schlechte Einrichtung besitzen. Die Anhäufung des Gepäcks an ihrem oberen Theil macht, dass sich der Schwerpunkt des ganzen Wagens, wenn er beladen ist, sehr hoch über dem Boden befindet, und die Oscillationen, welche ihm die Unebenheiten des Weges durch Vermittlung der Federn mittheilen, brauchen nicht gross zu sein, um den Wagen umzuwerfen.

§. 228. **Zugkraft, welche zur Fortbewegung eines Wagens erforderlich ist.** — Die Grösse der Zugkraft, welche erforderlich ist, um einen Wagen fortzubewegen, um also die passiven Widerstände zu überwinden, welche sich seiner Bewegung entgegenstellen, ändert sich bedeutend mit den Umständen, unter denen diese Bewegung stattfindet. Um die Grösse dieser Kraft und die Gesetze der Aenderungen, welche sie in verschiedenen Fällen erfährt, zu bestimmen, hat man Versuche angestellt. Wir wollen hier die hauptsächlichsten Resultate angeben, zu welchen man durch dieselben gelangt ist.

Indem man allein die Ladung des Wagens abänderte und ihn immer auf demselben Weg sich bewegen liess, hat man gefunden, dass die zu seiner Fortbewegung nöthige Zugkraft sehr nahezu proportional dem Drucke der Räder gegen den Weg, d. h. proportional dem Gewicht der Ladung vermehrt um das Gewicht des Wagens selbst ist. Dies war auch nicht anders zu erwarten, weil die Widerstände des Gleitens und Rollens proportional dem Druck sind, und die angewandte Kraft fast ausschliesslich zur Ueberwindung dieser Widerstände verwendet wird.

Für dieselbe Beschaffenheit des Wegs und für die nämliche Belastung ändert sich die Zugkraft im umgekehrten Verhältniss

des Durchmessers der Räder. Dies musste ebenfalls nach dem, was wir in §. 168 gesagt haben, erwartet werden.

Wenn die Fortbewegung der Räder auf dem Wege von Stössen begleitet ist, wie auf gepflasterten oder überhaupt sehr harten Strassen, so wächst die Zugkraft mit der Geschwindigkeit. In anderen Fällen bleibt die Zugkraft dieselbe, welches auch die Geschwindigkeit ist. Auch dieses Resultat war nach dem, was wir über den Arbeitsverlust durch Stösse gesagt haben, leicht vorauszusehen. Auf weichen Wegen, im Sand z. B., muss die Zugkraft in dem Maasse grösser werden, als die Breite der Räder abnimmt; auf hartem Terrain dagegen ist die Zugkraft von der Breite der Räder fast unabhängig.

Was die Art und Weise betrifft, in welcher sich die Zugkraft mit der Beschaffenheit des Weges ändert, so wird man davon einen Begriff durch die folgende Tabelle erhalten können, welche das Verhältniss der Zugkraft zum Totalgewicht des Wagens unter Umständen, welche sich gewöhnlich darbieten, und für Räder von der Grösse, wie sie gewöhnlich gebraucht werden, gibt.

Tab. 13. Widerstandscoëfficienten der Fuhrwerke.

Beschaffenheit des Weges.	Verhältniss der Zugkraft zur Gesammtbelastung.
Natürliches Terrain, nicht geschlagen, thonig, trocken	0,250
Natürliches Terrain, nicht geschlagen, kiesig .	0,165
Festgeschlagenes, sehr wohl geebnetes Terrain	0,040
Strasse mit Sand oder feinem Kies beschottert, frisch aufgeschüttet	0,125
Schotterstrasse, im gewöhnlichen Zustand . .	0,080
Schotterstrasse im besten Zustand, glatt gefahren	0,033
Gepflasterte Strasse, die Wagen mit Federn, im Schritt	0,030
Gepflasterte Strasse, die Wagen mit Federn, im scharfen Trab	0,070
Brückenbahn von Eichenholz, ungehobelt . .	0,022
Fahrbahn mit Geleisen aus Gusseisen oder sehr harten Steinplatten	0,010
Eisenbahn mit randlosen Kantenschienen, im guten Zustande	0,007
Eisenbahn, dessgl., die Achsen fortwährend geschmiert erhalten	0,005

Diese Tabelle zeigt deutlich, welchen grossen Vortheil unter dem Gesichtspunkt der aufzuwendenden Zugkraft die Eisenbahnen darbieten. Auf solchen Bahnen kann mit derselben Kraft eine weit grössere Last fortbewegt werden als auf den gewöhnlichen Strassen, wie gut auch diese letzteren gebaut und unterhalten sein mögen. Wir werden etwas weiter unten näher auf die Einrichtungen bei denselben eingehen.

§. 229. **Transport auf geneigter Bahn.** — Wenn eine Last für sich allein oder mittelst eines Wagens auf horizontalem Wege transportirt wird, so übt das Gewicht dieser Last und des Wagens, wenn ein solcher vorhanden ist, einen Druck senkrecht gegen den zurückzulegenden Weg aus. Dieses Gewicht kann also direkt keine Wirkung hervorbringen, es kann die Bewegung weder verzögern, noch beschleunigen; es wirkt nur indirekt, indem es passive Widerstände hervorbringt, welche ihm proportional sind, und welche durch die Zugkraft überwunden werden müssen. Dies ist nicht mehr der Fall, wenn die Last auf geneigtem Wege fortbewegt werden soll. Dann kann ihr Gewicht, das natürlich immer noch eine vertikal abwärts wirkende Kraft ist, die im Schwerpunkt G (Fig. 338) angreift, in zwei Seitenkräfte GB, GC zerlegt werden, von denen die eine parallel zum Weg, die andere senkrecht dazu ist. Die letztere Componente, diejenige, welche senkrecht zur Richtung des Weges ist, kann direkt die Geschwindigkeit der Last weder vermehren, noch vermindern, aber sie ist es, welche die Widerstände des Gleitens und des Rollens hervorbringt, welche Widerstände ihr proportional sind. Die erste Componente dagegen, welche parallel zur Richtung des Weges ist, übt ihre vollständige Wirkung aus; sie sucht die Geschwindigkeit zu vermehren oder zu vermindern, je nachdem sie im Sinne der Bewegung oder im entgegengesetzten Sinne gerichtet ist.

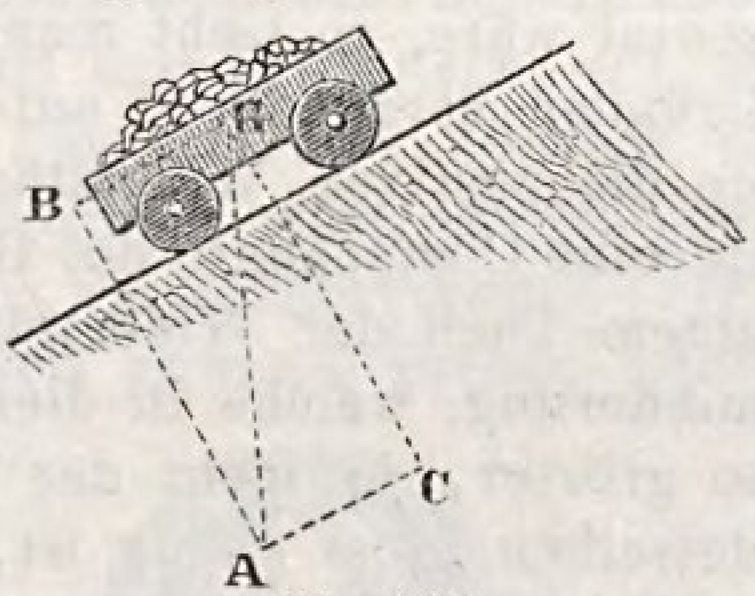


Fig. 338.

Wenn man die Last die geneigte Bahn aufwärts bewegt, so muss die anzuwendende Zugkraft einmal die passiven Widerstände überwinden, welche durch die Bewegung hervorgebracht werden, dann aber auch die Componente des Gewichtes der Last, welche parallel zum Weg ist. Der von der Last gegen die Bahn ausgeübte Druck ist weniger gross, als wenn die Bahn horizontal wäre, weil dieser Druck nur eine rechtwinkelige Componente

ihres Gewichtes ist; die Neigung des Wegs veranlasst also eine Verminderung der passiven Widerstände, welche aus diesem Drucke folgen. Aber während die Zugkraft von diesem Gesichtspunkt aus eine Verminderung erfährt, wenn die Last aufwärts bewegt werden soll, so wird diese Verminderung durch die Vermehrung, welche sie erhalten muss, um die Componente GB (Fig. 338) des Gewichtes der Last überwinden zu können, mehr als compensirt. Im Ganzen ist allemal eine grössere Kraft nothwendig, um die Last eine schiefe Bahn aufwärts zu bewegen, als sie auf horizontalem Wege weiter zu schaffen, und zwar wird diese Kraft um so grösser, je stärker die Neigung des Weges ist.

Wenn sich die Last längs des geneigten Weges abwärts bewegt, so wirkt die Componente ihres Gewichts, die parallel zur Richtung des Weges ist, im Sinne der Bewegung. Diese Componente hält also schon einem Theil der passiven Widerstände das Gleichgewicht, und die Zugkraft, welche man aufwenden muss, hat folglich nur noch den übrigen Theil dieser Widerstände zu überwinden. Wenn man ausserdem noch bemerkt, dass der senkrecht gegen die Bahn ausgeübte Druck wie im vorhergehenden Fall schwächer ist, als wenn der Weg horizontal wäre, so sieht man, dass die Neigung der Bahn aus zwei Gründen vermindernd auf die Zugkraft einwirkt: erstens, indem sie die passiven Widerstände verkleinert, und zweitens, indem sie eine Componente des Gewichts der Last hervorbringt, welche einem Theil der Widerstände das Gleichgewicht hält. Die Verminderung, welche in diesem Falle die Zugkraft erfährt, ist um so grösser, je mehr der Weg geneigt ist. Wenn die Neigung desselben gross genug ist, so kann die Zugkraft sogar auf Null reducirt werden; alsdann hält die zur Richtung des Weges parallele Componente des Gewichtes den passiven Widerständen allein das Gleichgewicht. Wenn die Neigung noch grösser wird, so ist es nicht blos unnöthig, an der Last abwärts zu ziehen, sondern man muss dieselbe sogar durch eine Kraft, welche im entgegengesetzten Sinne der Bewegung wirkt, zurückhalten, wenn man nicht will, dass sich die Geschwindigkeit in's Uebermässige vergrössert. Man sieht in der That, dass in einem solchen Fall die passiven Widerstände schon durch einen Theil derjenigen Componente des Gewichts, welche in der Richtung der Bewegung wirkt, im Gleichgewicht gehalten werden, während der andere Theil dieser Componente die Geschwindigkeit des Körpers ohne Aufhören vermehren würde, wenn man ihr nicht eine ebenso grosse Kraft entgegensetzte. Desshalb müssen die

Pferde den Wagen, an welchen sie gespannt sind und der eine stark geneigte Bahn herabgeht, zurückhalten, wenn sich die Bewegung desselben nicht übermässig beschleunigen soll. Es kommt sogar vor, dass man, wenn es sich um einen schwerbeladenen Wagen handelt, welcher durch mehrere hinter einander gespannte Pferde gezogen wird, die Pferde mit Ausnahme derer an der Deichsel ausspannt, um sie hinter den Wagen zu spannen und dort eine Zugkraft hervorbringen zu lassen, welche, entgegengesetzt dem Sinne der Bewegung wirkend, den Theil der zum Wege parallelen Componente des Gewichts aufhebt, welcher durch die passiven Widerstände nicht im Gleichgewicht gehalten wird.

Um das Zurückhalten des Wagens bei stärkerem Gefäll des Weges zu erleichtern, bringt man gewöhnlich B r e m s e n an demselben an, mit deren Hilfe man die passiven Widerstände vermehren kann. Diese Bremsen bestehen aus Platten von Eisen oder auch aus Stücken Holz, welche man hinter oder vor den Rädern, ganz nahe an ihrem Kranze, in der Höhe ihrer Achsen anbringt (Fig. 339). Sie werden mittelst einer Schraube entweder gegen die Hinter- oder gegen die Vorderräder des Wagens angedrückt. Der dadurch hervorgebrachte Druck der Bremse gegen den Radkranz ruft eine Reibung hervor, welche sich zu den anderen passiven Widerständen summirt und die um so grösser ist, je stärker die Bremse angedrückt wird. Es ist aber leicht einzusehen, dass die hiedurch hervorzubringende Vermehrung der passiven Widerstände eine gewisse Grenze nicht

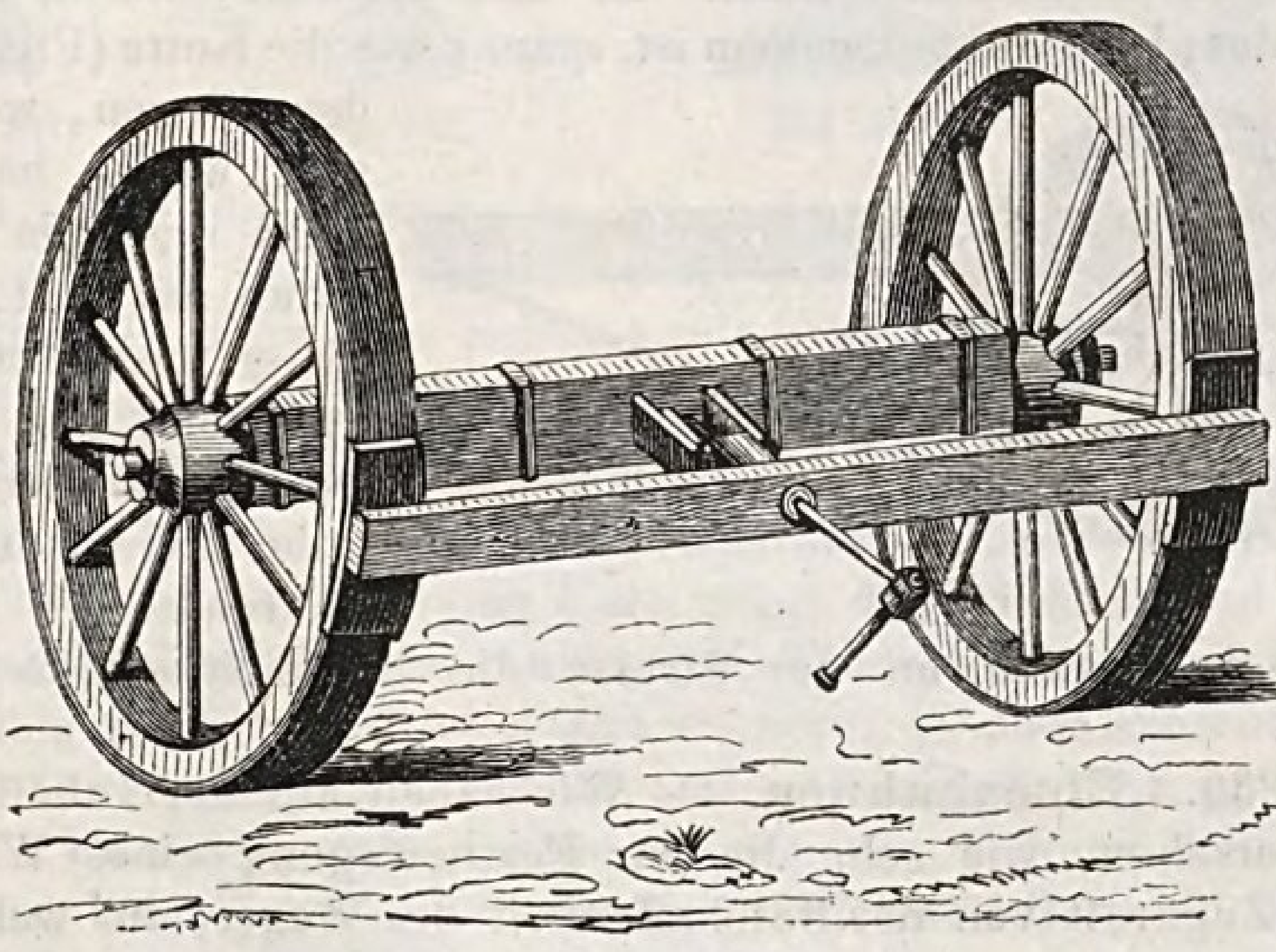


Fig. 339.

überschreiten kann. Denn wenn die Bremse zu stark angedrückt wird, so verhindert sie die Räder sich zu drehen, sodass dieselben auf der Strasse fortgleiten, als wenn sie an dem Wagen völlig festgemacht wären. Dieser Fall tritt offenbar dann ein, wenn die gleitende Reibung des Radkranzes an der Strasse kleiner ist, als die Reibung der Bremse an ihm selbst. Sobald also der Druck der Bremse gegen den Radkranz eine grössere Reibung hervorzubringen im Stande wäre als durch das Gleiten des feststehenden Rades an der Strasse entsteht, so dreht sich das Rad nicht mehr herum, jene Reibung wird nicht hervorgebracht, sondern durch die des Rades an der Oberfläche der Strasse ersetzt.

Es ist jedoch nachtheilig, die Bremse so stark gegen die Räder zu drücken, dass sie sich nicht mehr drehen können; wenn die Räder gleiten, anstatt zu rollen, so nützen sie sich an einer einzigen Stelle ihres Umfanges unverhältnissmässig stark ab, wodurch ihre Gestalt unregelmässig wird und sie selbst bald zu Grunde gehen. Um diese Abnützung in dem Fall, wo man das Rollen eines Rads durch ein Gleiten ersetzen muss, zu verhindern, bedient man sich eines Stückes Eisen, Radschuh genannt, welches man unter das Rad legt, sodass es allein die ganze Abnützung zu tragen hat, welche durch das Gleiten veranlasst wird. Dabei darf man den Radschuh, der mittelst einer Kette von passender Länge an dem Gestell des Wagens befestigt ist, nur vor eines der Räder legen, sodass dasselbe im Rollen auf ihn zu stehen kommen muss. In dem Moment, wo es in der Mitte seiner Länge angekommen ist, spannt sich die Kette (Fig. 346); der Wagen, welcher sich weiter bewegt, zieht nun den Radschuh mit fort, und dieser, indem er fortwährend das Rad trägt, verhindert dasselbe sich zu drehen, während er selbst durch sein Gleiten an der Strasse die beabsichtigte Reibung erzeugt.

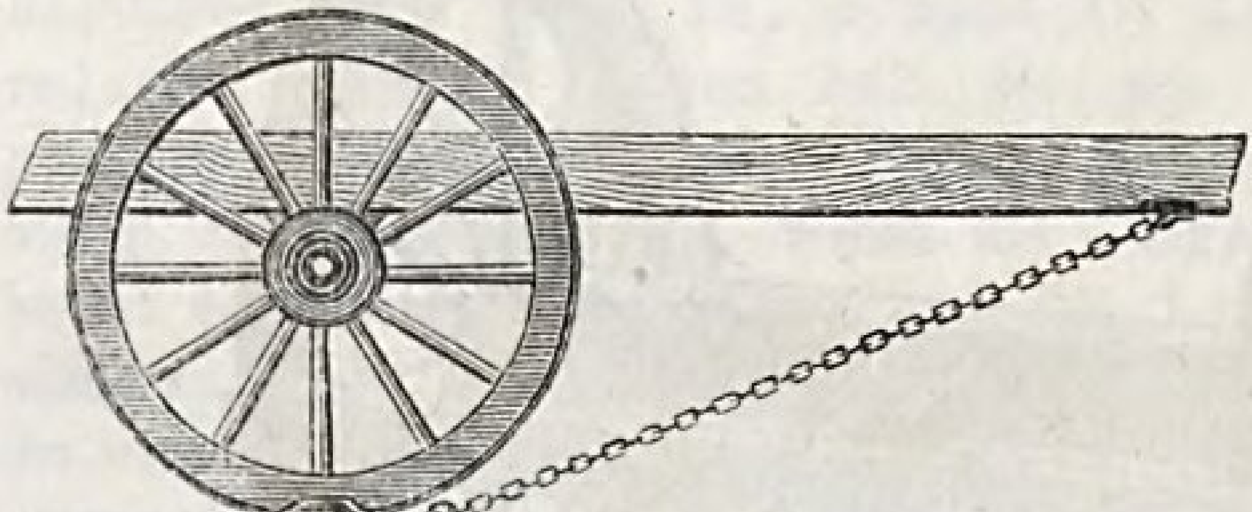


Fig. 340.

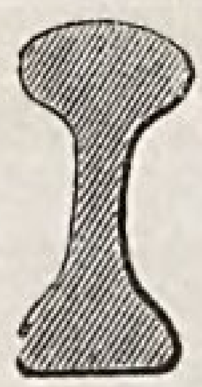
§. 230. **Eisenbahnen.** — Wir haben aus der Tabelle auf S. 472 ersehen, wie sehr die zur Fortbewegung eines Wagens nöthige Zugkraft von der Beschaffenheit des Weges, auf welchem die Bewegung vor sich geht, abhängt. Um diese Zugkraft so

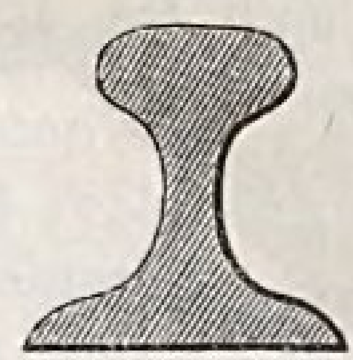
viel als möglich zu verringern, hat man die Eisenbahnen gebaut, auf welchen man mit dem nämlichen Aufwande von Kraft viel schwerere Lasten fortschaffen kann als auf den gewöhnlichen Strassen der besten Art.

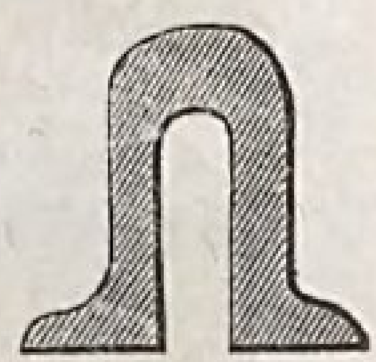
Man hat anfangs die Eisenbahnen mit sogenannten Spurschienen gebaut, welche einen nach oben vorstehenden Rand besassen und auf welchen die gegen den Kranz hin dünner werdenden Räder von linsenförmiger Gestalt rollten. Aber diese Spurschienen, deren Idee von den Geleisen genommen war, die sich von selbst auf den Strassen bilden, haben bald grosse Mängel gezeigt: es häuft sich Unrath aller Art darin an, welcher der Leichtigkeit des Rollens sehr nachtheilig ist und so einen grossen Theil der Vortheile wieder aufhebt, welche man durch den Bau der Bahn erreichen will. Bahnen mit Spurschienen existiren nur noch in Deutschland und England in den Bergwerken und in der Nachbarschaft derselben. Neue werden jedoch, aus Ursache der oben bezeichneten Mängel, nicht mehr gebaut.

Die jetzt allgemein angewandten Schienen sind die sogen. randlosen Kantenschienen. Dieses sind starke Stangen von Schmiedeisen von verschieden geformtem Querschnitt. Die Fig. 341—344 stellen einige der gebräuchlichsten dieser Formen dar. Die beiden


Fig. 341.


Fig. 342.


Fig. 343.


Fig. 344.

ersten geben die Querprofile der sog. einfachen und doppelten Stuhlschienen. Die Fig. 343 zeigt eine in neuester Zeit sehr zweckmässig befundene Schiene mit breiter Basis, die sog. Vignolschiene. Nicht selten kommen auch die Hohl- oder Brückenschienen (Fig. 344) in Anwendung.

Die Schienen haben gewöhnlich eine Länge von 15 bis 18, auch 20 Fuss; der laufende Fuss wiegt 15—25 Pfd. Die grösste Belastung einer Schiene durch ein Rad soll 120 Centner nicht übersteigen. Der lichte Abstand zwischen je zwei Schienen einer Bahn, die sog. Spurweite ist fast auf allen Bahnen gleich und zwar 4 Fuss $8^1/_2$ Zoll engl. Nur wenige Bahnen haben eine grössere Breite, wie z. B. die Great-Western-Bahn in England, deren Spurweite 7 Fuss engl. beträgt.

Die Schienen liegen auf Unterlagen von Holz (Schwellen) oder Stein (Würfel). Erstere sind starke, 8—9 Fuss lange Eichen- oder Fichtenhölzer, die in Entfernungen von $2\frac{1}{2}$ bis 3 Fuss von einander senkrecht zur Längenrichtung der Bahn in den Boden versenkt werden. Letztere sind Steinstücke, wo möglich von Granit, 1,8 Fuss lang und ebenso breit, 0,8 Fuss hoch und werden in 2 Reihen nebeneinander, eine für jeden Schienenstrang, in lichte Entfernungen von ca. $\frac{1}{4}$ Fuss von einander gelegt, indem man sie gleichfalls mit ihrer ganzen Höhe in den Boden versenkt. Man gibt dem Holze wegen seiner grösseren Elasticität den Vorzug. Und selbst bei Würfelbahnen legt man an die Stellen, wo die Schienen zusammenstossen (Stossfugen), starke eichene Schwellen. Die Befestigung der Schienen auf ihrer Unterlage geschieht entweder mittelst sog. Schienenstühle und Holzkeile (Fig. 345) oder durch Schrauben *g* und Hakennägel *d* (Fig. 346). Die erstere Befestigungsart wird besonders bei den Stuhl-, letztere bei den Vignolschienen angewendet. Die Fig. 346 zeigt ausserdem einige der gebräuchlichsten Formen der Schwellen.

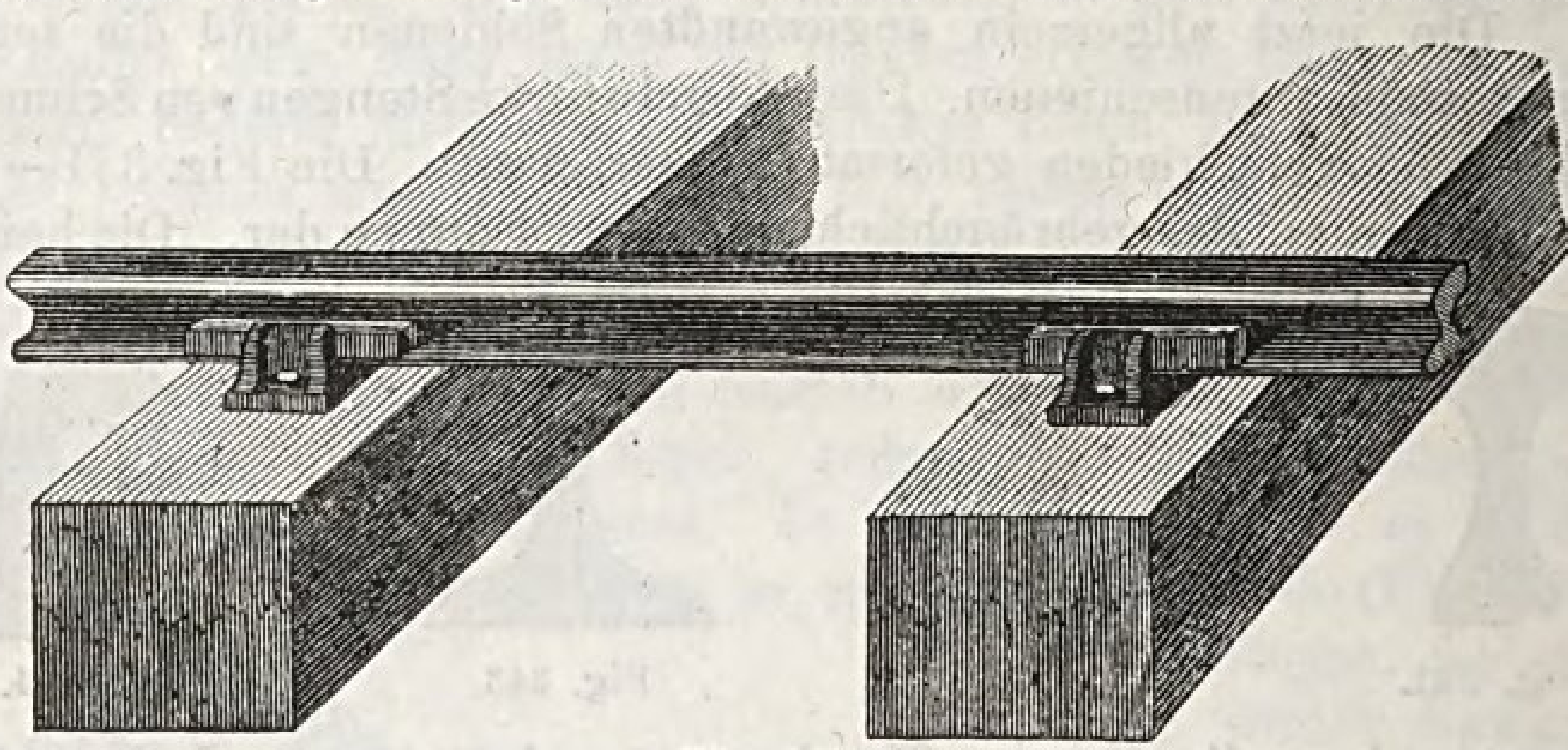


Fig. 345.

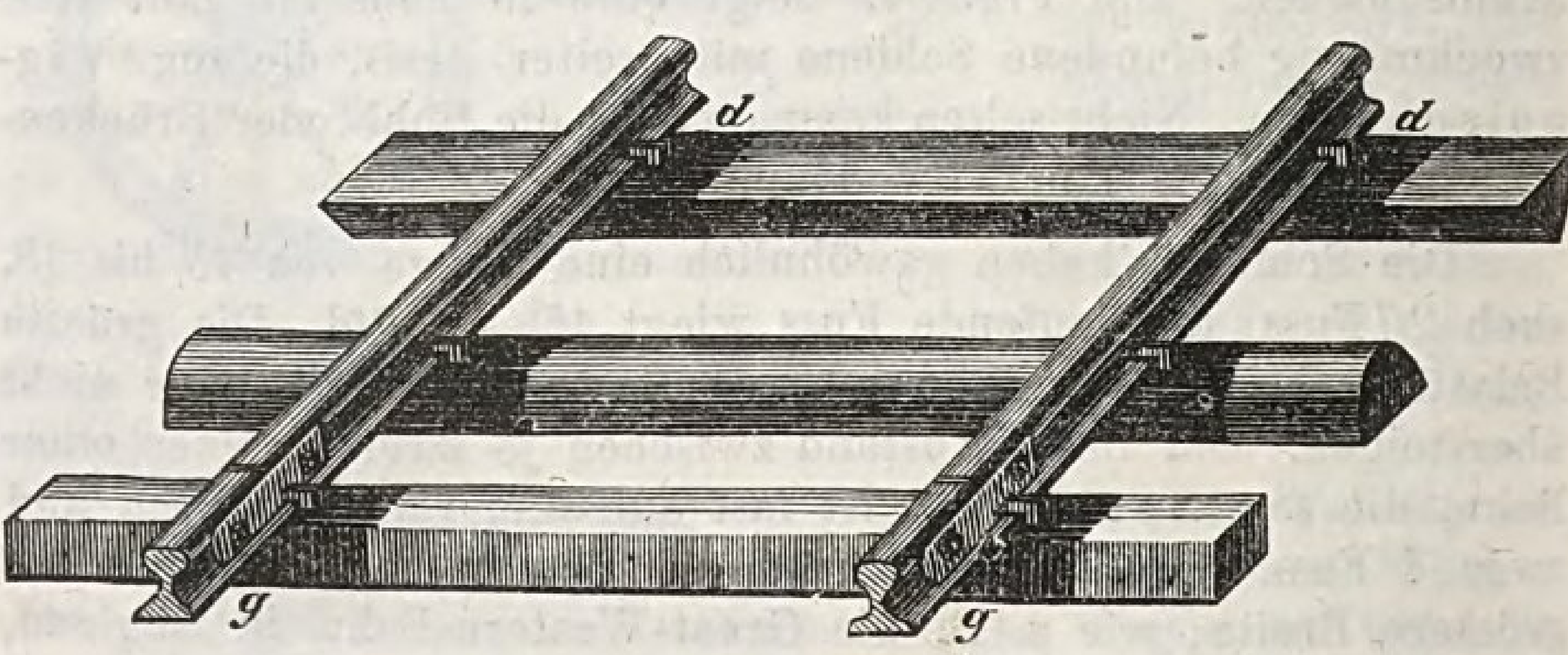


Fig. 346.

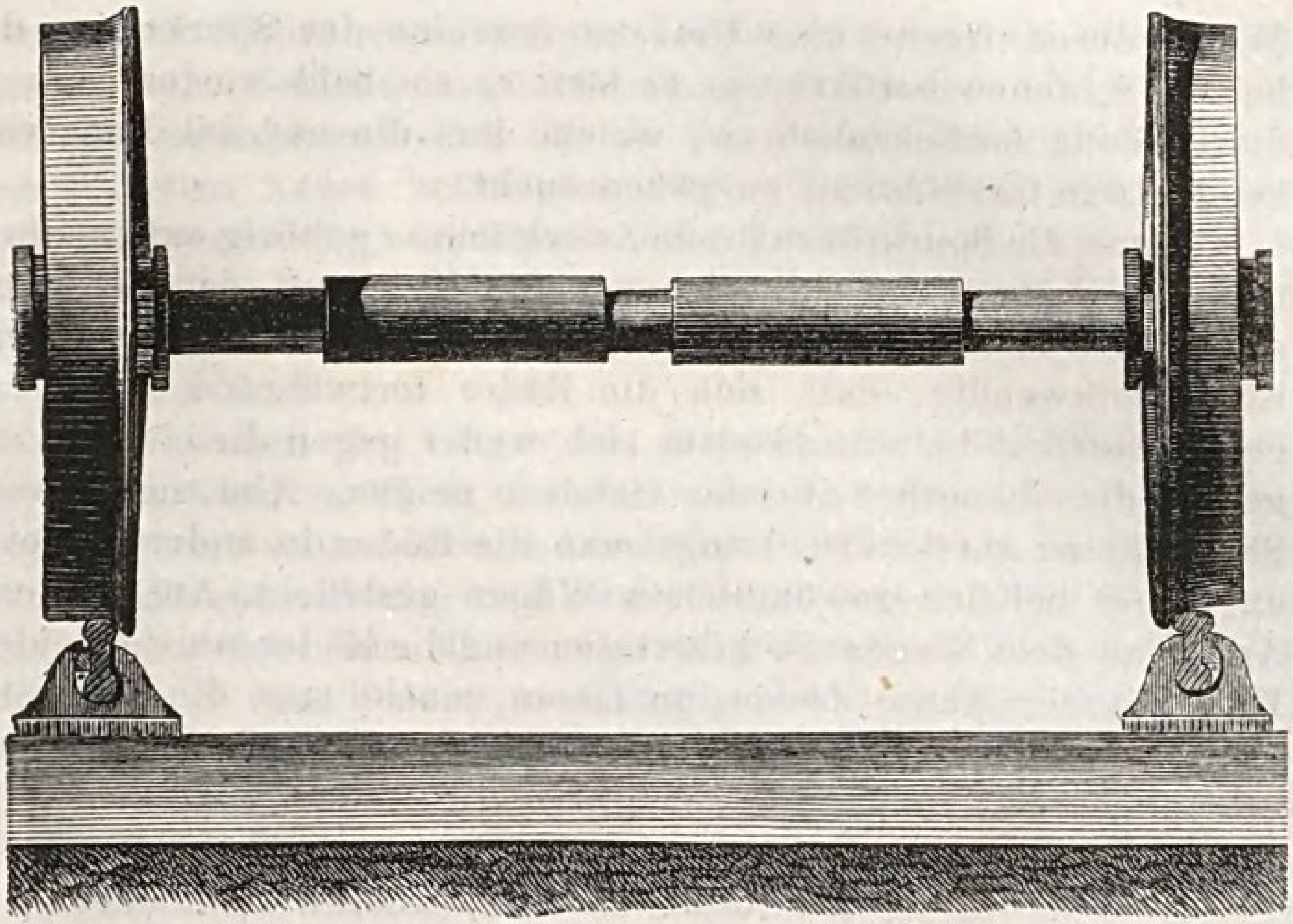


Fig. 347.

Die Räder der Wägen, welche auf den oben abgebildeten Schienen laufen müssen, könnten sich auf der oberen Fläche derselben nicht halten, wenn ihr Kranz nicht einen Rand, den sog. Spurkranz, besässe (Fig. 347). Dieser Rand geht bei beiden Rädern, welche sich auf einer und derselben Achse befinden, auf der ins Innere des Geleises gekehrten Seite etwas über die Oberfläche der Schienen herunter und verhindert so die Räder auszugleisen. — Wenn aus irgend einer Ursache die Räder nach der einen oder anderen Seite aus dem Geleise zu gehen suchen, so setzen sich die Spurkränze diesem Bestreben entgegen, indem sie sich gegen die inneren Seiten der Schienen anlegen. Es folgt daraus eine gleitende Reibung der Spurkränze an den Schienen, welche die Widerstände vermehrt. Um die Entstehung dieser Reibung möglichst zu vermeiden, gibt man dem Radkranz eine schwach konische Form, wie es Fig. 347 zeigt. Man neigt auch die Schienen etwas gegen das Innere des Geleises und gibt ihnen eine etwas grössere Entfernung, als die Distanz zwischen den äusseren Rändern der Spurkränze zweier zusammengehöriger Räder beträgt. Auf diese Art bewirkt das Gewicht des Wagens, dass sich die beiden Radkränze eines Räderpaares so viel als möglich mit ihrem verjüngten Theil gegen die Schienen stützen und hält so die beiden Spurkränze auf eine kleine Entfernung ($^5/_8$ — $^7/_8$ Zoll) von den inneren Seiten der Schienen entfernt.

Wenn durch irgend eine Ursache der eine der Spurkränze die beiden Schienen berührt, so verlässt er sie bald wieder, um in die Stellung zurückzukehren, welche ihm die auf das Rad wirkende Last fortwährend zu geben sucht.

Damit die Spurkränze ihrem Zweck immer gehörig entsprechen und die Wägen eine hinreichende Stabilität auf den Schienen erhalten, selbst wenn sie sich mit grosser Schnelligkeit bewegen, ist es nothwendig, dass sich die Räder fortwährend möglichst genau vertikal halten, dass sie sich weder gegen die innere noch gegen die äussere Seite des Geleises neigen. Um sich dieser Stabilität zu versichern, bringt man die Räder in anderer Weise an, als es bei den gewöhnlichen Wägen geschieht. Anstatt jede Achse an dem Wagen zu befestigen und die Räder um die beiden Enden dieser Achse drehen zu lassen, macht man die Räder an den Achsen fest. Diese letzteren müssen also mit den Rädern beweglich sein, indem sie sich in Lagern drehen, welche an dem untern Theil des Wagens angebracht sind.

Die Befestigung der Räder an ihren Achsen zieht aber eine Consequenz nach sich, welche wir angeben müssen. Nach dieser Anordnung müssen sich die beiden Räder, welche an den Enden ein und derselben Achse angebracht sind, mit einander drehen, d. h. sie müssen beide in derselben Zeit die nämliche Zahl von Umdrehungen machen. Dies stört zwar die Bewegung nicht im geringsten, so lange dieselbe auf geradem Geleise stattfindet. Wenn aber das Geleise gekrümmt ist, so ist der äussere Schienenstrang, d. h. derjenige, welcher an der convexen Seite des Geleises liegt, länger als der innere; wenn sich daher die beiden Räder frei und unabhängig von einander drehen könnten, so würde sich dasjenige, welches auf der äusseren Schiene läuft und also in derselben Zeit einen grösseren Weg zurückzulegen hat, schneller drehen als das auf der inneren Schiene. Wenn dagegen die Räder an der Achse festgemacht sind, so sind sie gezwungen, sich in ihrer Bewegung fortwährend zu accommodiren. Daraus folgt, dass entweder das äussere, oder das innere, oder in den meisten Fällen wohl beide Räder zugleich etwas auf den Schienen schleifen müssen; das äussere, indem es sich langsamer, das innere, indem es sich schneller dreht, als es seiner Fortbewegung auf seiner Schiene entsprechen würde. Das Rollen der beiden gleich grossen Räder, die auf einer gemeinschaftlichen Achse festgemacht sind, kann folglich auf einem krummen Geleise nicht stattfinden, ohne dass ein Gleiten entsteht. Dieses Gleiten veranlasst aber eine Reibung, welche die Zugkraft entsprechend

vermehrt. Wenn man daher die Vortheile, welche die Eisenbahnen unter dem Gesichtspunkt der kleinstmöglichen Zugkraft darbieten, wahren und doch die an den beiden Enden einer gemeinschaftlichen Achse befestigten Räder beibehalten will, so muss man es vermeiden, der Bahn starke Krümmungen zu geben; man muss sie aus geraden Linien zusammensetzen, die durch wenig gekrümmte Curven, gewöhnlich Kreisbögen mit grossem Radius verbunden sind.

Wenn sich ein Wagen mit bedeutender Geschwindigkeit in dem gekrümmten Theil eines Geleises bewegt, so ruft seine Bewegung eine sehr merkbare Centrifugalkraft hervor, die horizontal, senkrecht zum Geleise und nach der convexen Seite der Krümmung gerichtet ist. Diese Centrifugalkraft sucht offenbar den Wagen aus dem Geleise zu drängen, und es folgt daraus, dass sich die Spurkränze der Räder, welche sich auf der convexen Seite befinden, an dem äusseren Schienenstrang reiben. Um diese Reibung zu verhindern, legt man längs der ganzen Krümmung die äusseren Schienen etwas höher als die inneren, sodass ein Wagen, wenn er sich in diesem Theil der Bahn befindet, wie auf einer nach der Quere geneigten schiefen Ebene steht. Die Differenz der Höhe der beiden Schienen wird so bestimmt, dass die Resultante aus dem Gewicht des Wagens und der Centrifugalkraft, welche sich entwickelt, wenn er die gewöhnliche Geschwindigkeit besitzt, senkrecht gegen die Ebene gerichtet ist, welche durch die oberen Flächen der beiden Schienen gelegt wird. Durch diese Einrichtung ist jeder der beiden Spurkränze ebenso gut in gewisser Entfernung von seiner Schiene gehalten, als wenn sich der Wagen auf gerader Bahn bewegen würde, wo die beiden Schienen in gleicher Höhe liegen.

Wir werden bald sehen, dass die Anwendung der Lokomotiven zur Bewegung der Wagenzüge auf den Eisenbahnen erfordert, dass auf diesen Bahnen keine zu starken Neigungen stattfinden. Aber auch ausserdem würden schon nur etwas starke Neigungen die grossen Vortheile wieder verschwinden machen, welche man mit der Anwendung von Eisenbahnen beabsichtigt. Desshalb baut man dieselben so viel als möglich horizontal und wendet starke Neigungen nur in Ausnahmsfällen an. Daraus folgt, dass man das natürliche Terrain an Stellen, wo es sich über das Niveau welches man dem Geleise geben will, erhebt, abtragen muss, während man an anderen Stellen, wo es sich zu tief senkt, genöthigt ist, Auftragungen oder Dämme zu machen. Wenn die Niveau-Unterschiede sehr gross sind, so baut man T u n n e l s und V i a d u c t e.

§. 231. Es würde von grosser Wichtigkeit sein, wenn man bei den Eisenbahnlinien Curven von kleinem Radius anwenden könnte; dies würde gestatten, dieselben so zu legen, dass Uebergänge über Berge und Thäler mehr vermieden werden könnten, und dass man sich in geringerer Entfernung von der Oberfläche des natürlichen Terrains halten könnte. Dadurch würde der Bau von Eisenbahnen viel einfacher und daher viel weniger kostspielig werden. Um diesen Zweck zu erreichen, hat man verschiedene Mittel vorgeschlagen; wir wollen uns damit begnügen, dasjenige anzugeben, welches von Herrn *Arnoux* herrührt und auf der Eisenbahn von Paris nach Sceaux Anwendung gefunden hat.

Wir haben oben gesehen, dass es besonders die feste Verbindung der Räder mit ihren Achsen ist, warum Curven von kleinem Radius vermieden werden müssen, da in Folge der ungleichen Länge der beiden Schienenstränge ein Schleifen der Räder an den Schienen entsteht. *Arnoux* hat zunächst den Rädern ihre Beweglichkeit um die beiden Enden der Achse wieder gegeben, sodass sich die Räder an einer und derselben Achse unabhängig von einander drehen und jedes derselben die der Länge des Weges, den es zu durchlaufen hat, entsprechende Anzahl von Umdrehungen machen kann, ohne auf der Schiene gleiten zu müssen.

Aber dies allein reicht nicht aus. Damit das Rollen der Räder in passender Weise stattfindet und sich ihre Spurkränze nicht an den Rändern der Schienen reiben, muss in jedem Augenblick die Ebene jedes Rads durch die Tangente gehen, welche im Berührungspunkt desselben mit der Schiene an diese letztere gelegt wird. Es muss also die Achse jedes Räderpaars stets senkrecht zu den Schienen, d. h. senkrecht zur Bahnlinie stehen. Daraus folgt, dass die beiden Achsen eines und desselben Wagens, wenn derselbe in eine Curve kommt, nicht parallel bleiben können; sie müssen vielmehr die Richtungen zweier Radien des Kreises besitzen, von welchem die Curve ein Theil ist, und daher nach dem Mittelpunkt dieses Kreises convergiren. Daher hat *Arnoux* die Achsen um Reibnägel beweglich gemacht, wie es bei der vorderen Achse der gewöhnlichen, vierräderigen Wägen der Fall ist; und damit sich jede Achse, indem sie sich um ihren Reibnagel dreht, stets senkrecht zur Richtung der Bahnlinie stellt, ist folgende Einrichtung von ihm getroffen worden:

Die erste Achse A A eines Zugs (Fig. 348) wird durch kleine Laufräder B, B gerichtet, deren vier vorhanden sind und deren Achsen durch Zwingen getragen werden, die an der Wagenachse

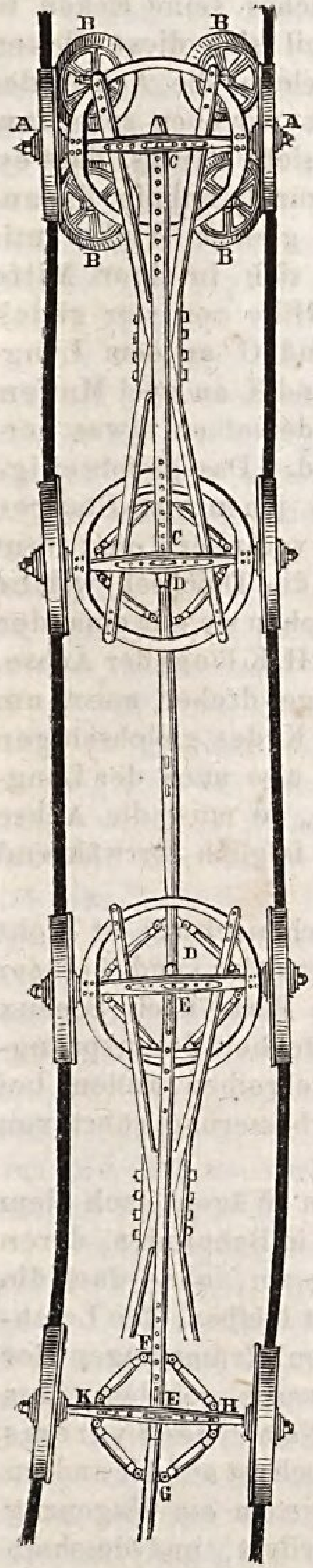


Fig. 348.

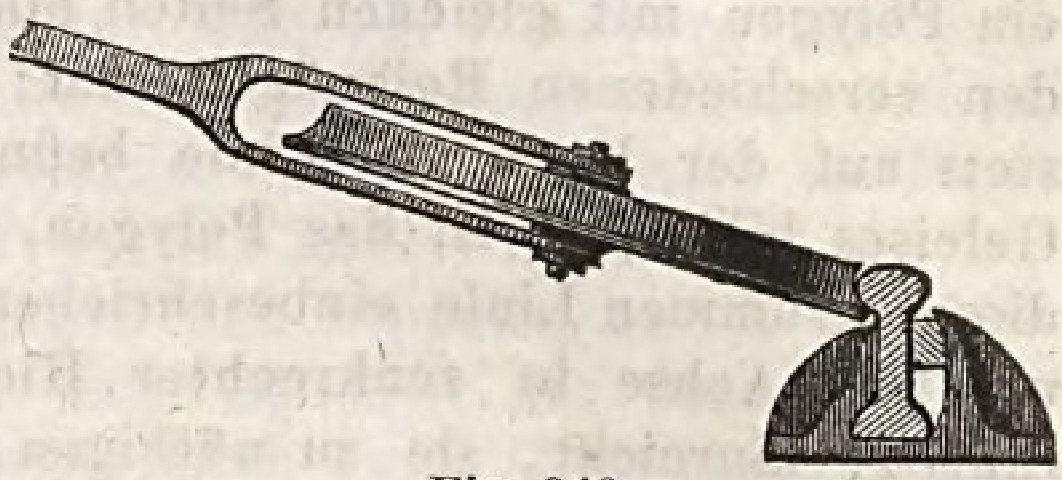


Fig. 349.

selbst befestigt sind. Diese Räder stützen sich gegen die innere Seite jedes der beiden Schienenstränge, sodass sich die Spurkränze, mit denen sie versehen sind, unter die vorstehenden Ränder der Schienen legen, wie es Fig. 349 zeigt. Die Laufrädchen B, B richten also die Achse A A stets senkrecht auf die Richtung der Bahn, in welchem Sinne sich dieselbe auch krümmt. Auf dieselbe Art wird die letzte Achse des Zugs stets in senkrechter Richtung gegen die Bahnlinie erhalten.

Um den zwischen der ersten und letzten Achse gelegenen Zwischenachsen in jedem Augenblicke die Richtung zu geben, welche sie haben müssen, wird das folgende Mittel angewandt. Die Wägen sind nicht mittelst Ketten und Federn unter einander verbunden, wie es gewöhnlich bei den Eisenbahnwägen der Fall ist, sondern durch starre Stangen oder Deichseln, welche zu beiden Seiten in Reibnägeln endigen, um welche sie sich frei drehen können. So folgt auf den Langbaum C C, welcher die beiden Reibnägel des ersten Wagens verbindet (Fig. 348), eine Deichsel D D, welche den zweiten Reibnagel des ersten Wagens mit dem ersten Reibnagel des zweiten Wagens in Verbindung setzt; ebenso folgt auf den Langbaum E E des zweiten Wagens eine Deichsel E G, welche zur Verbindung des zweiten und dritten Wagens dient, u. s. f. Daraus folgt, dass die Langbäume und Deichseln, die sämmtlich von gleicher Länge sind,

ein Polygon mit gleichen Seiten bilden, welches seine Ecken in den verschiedenen Reibnägeln hat; und weil sich diese Ecken stets auf der krummen Linie befinden, welche die Achse des Geleises bildet, so ist das Polygon, von dem wir eben sprechen, dieser krummen Linie einbeschrieben. Man sieht daraus, dass es, um jede Achse in senkrechter Richtung zur Bahnlinie fortzuführen, hinreicht, sie zu nöthigen, immer gleiche Winkel mit den Langbäumen und Deichseln, welche sich in ihrer Mitte endigen, zu bilden. Man erreicht dies mit Hilfe von vier gleich langen Stangen, welche einestheils in F und G an dem Langbaum und der Deichsel, andererntheils in H und K an zwei Muffen, welche die Achse umhüllen und sich längs derselben etwas verschieben können, in Gelenken befestigt sind. Das gleichseitige Parallelogramm FHGK, dessen Seiten von jenen vier Stangen gebildet werden, kann also seine Gestalt verändern und thut dies in der That, wenn der Langbaum und die Deichsel, welche seine Ecken F und G tragen, den Winkel, welchen sie mit einander bilden, abändern. Alsdann gleiten die Muffen H, K längs der Achse, welche sich zu gleicher Zeit um den Reibnagel drehen muss, um sich stets in der Richtung der Diagonale HK des gleichseitigen Parallelogramms zu stellen. Welchen Winkel also auch der Langbaum und die Deichsel mit einander bilden, so muss die Achse stets gegen beide gleich geneigt sein und folglich fortwährend senkrecht auf der Bahnlinie stehen.

Diese letzte Einrichtung an den Zwischenachsen ist nicht diejenige, welche Herr *Arnoux* zuerst getroffen und bei der Construktion der Wägen auf der Bahn von Paris nach Sceaux angewandt hat. Sie ist aber durch ihre Einfachheit der ursprünglichen Einrichtung, die wir nicht näher beschreiben wollen, bei weitem vorzuziehen. Die Idee zu dieser Verbesserung rührt von dem Sohne des Herrn *Arnoux* her.

Ein Zug von beliebiger Länge, dessen Wägen nach dem System von *Arnoux* gebaut sind, kann sich in Bahnlinien, deren Krümmungen beliebig rasch wechseln, bewegen, ohne dass die Achsen aufhören, senkrecht zur Bahnlinie zu bleiben. Die Leichtigkeit, mit welcher sich der Zug nach den Krümmungen der Bahnlinie dreht und wendet, hat Veranlassung gegeben, dass man das System von *Arnoux* häufig mit dem Namen des Systems mit gegliederten Wägen bezeichnet. Doch ist auf der andern Seite nicht zu leugnen, dass durch dieses System ein Wagenzug viel von seiner Stabilität und Sicherheit verliert, und desshalb möchte es wohl kaum je allgemeinere Anwendung finden.

§. 232. Es kommt häufig vor, dass ein Schienengeleise sich spaltet, d. h. dass es sich in zwei verschiedene Geleise auflöst, welche sich von einander entfernen und deren jedes als Fortsetzung des ersten betrachtet werden kann. Wenn sich ein Zug auf dem einfachen Geleise gegen das doppelte hin bewegt, so ist es nöthig, dass man ihn nach Belieben auf das eine oder andere der beiden neuen Geleise leiten kann. Dies erreicht man mittelst der sog. Wechsel, die wir etwas näher beschreiben wollen (Figuren 350 und 351).

In Fig. 350 ist der Wechsel in solcher Stellung gezeichnet, dass ein Zug, welcher von der unteren Seite kommt, nur auf das Geleise AA, BB übergehen kann. Die Schienen A' und B' bilden den Anfang des zweiten Geleises. Die Schienenstücke CD, EF, welche an ihren einen Enden dünner zulaufen, können sich um ihre anderen Enden C, E drehen; sie heissen die Zungen des Wechsels. Ein eiserner Stab G, der an der Zunge EF befestigt ist, gehört dazu, diese Zunge herüber- oder hinüberbewegen zu können, sodass man ihr Ende F an die Schiene BB anlegen oder davon entfernen kann. Durch den Stab H wird dieselbe Bewegung zu gleicher Zeit der Zunge CD mitgetheilt, welche dadurch gleichfalls von der Schiene A' entfernt oder derselben genähert wird. Es ist leicht einzusehen, dass, wenn man den Stab G und mit ihm die beiden Zungenenden nach links bewegt, bis sich das Ende F an die Schiene BB anlegt, der Zug, welcher von unten kommt, nur auf die Schienen A', B' übergehen kann. Es reicht also hin, den Stab G im Sinne seiner Länge herüber zu ziehen oder hinüber zu drücken, um den Zug auf das eine oder andere der beiden Geleise zu leiten, welche die Fortsetzung desjenigen bilden, von welchem er kommt. Die Schiene KK, Zwangsschiene genannt, ist dazu bestimmt, das Entgleisen des Zuges in dem Moment zu verhüten, wo die Räder der Wägen auf die Zungen übergehen.

Die Bewegung des Eisenstabs G geschieht mittelst des Hebels LNM (Fig. 351), dessen Drehungspunkt M ist. Indem man das Ende L dieses Hebels erhebt, wird die Eisenstange G, welche in N mittelst eines Gelenks befestigt ist, herübergezogen; und indem man dasselbe wieder senkt, um ihm die in Fig. 351 gezeichnete Lage zu geben, nehmen die Zungen ihre ursprüngliche Lage wieder an, wie sie in Fig. 350 angegeben ist. Die Eisenmasse, welche an dem Hebel zunächst dem Handgriff L angebracht ist, hat den Zweck zu bewirken, dass er von selbst in der in der Figur angegebenen Lage verbleibt. Man braucht also den Wechsel

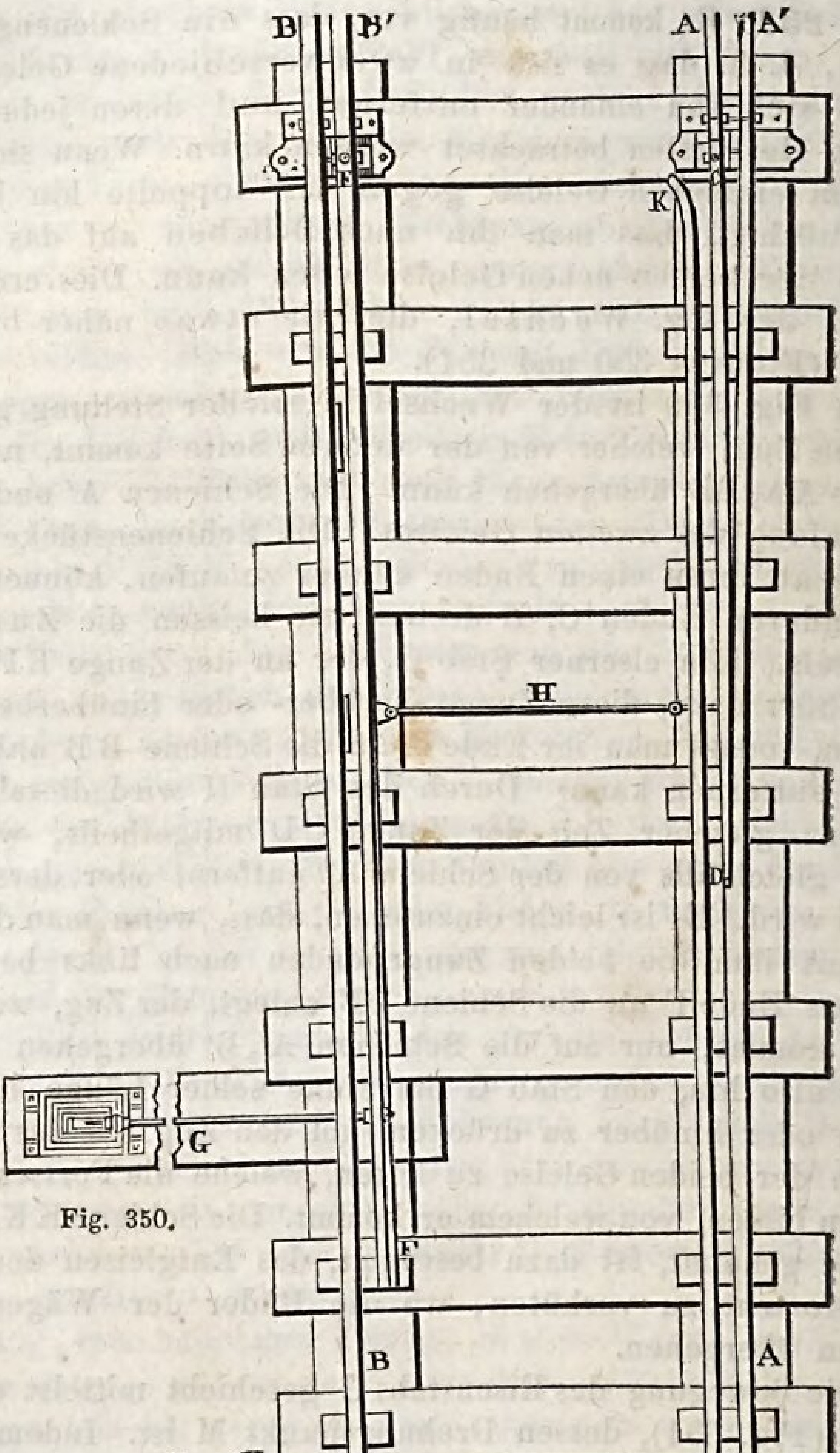


Fig. 350.

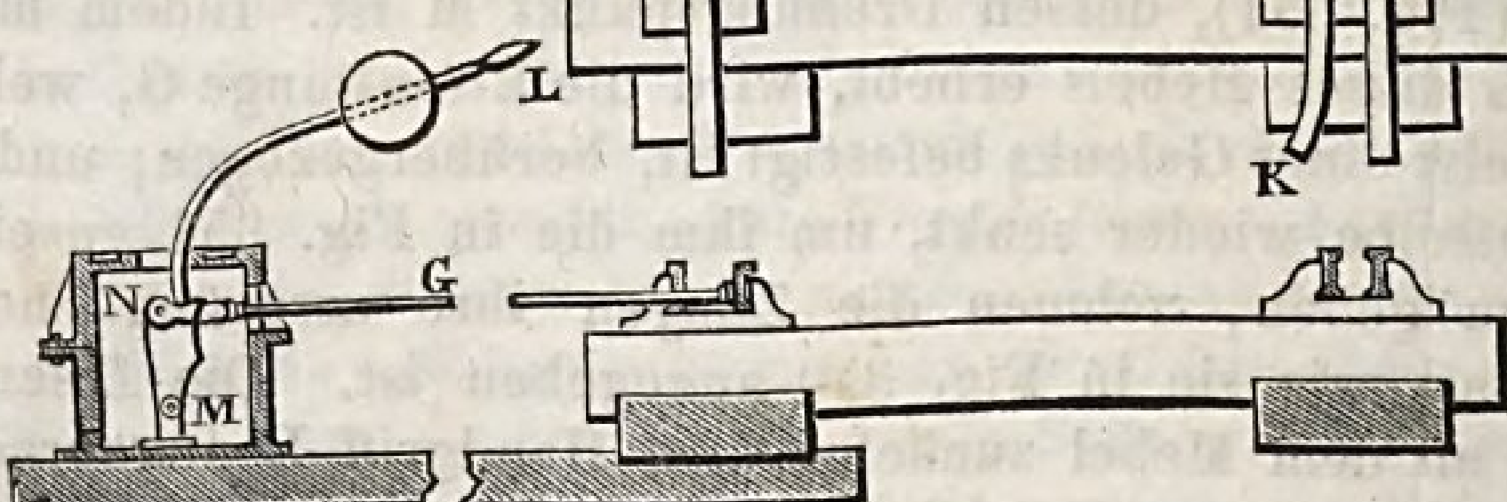


Fig. 351.

nur in dem Fall zu stellen, wo der Zug auf das Geleise A', B' übergehen soll.

Wenn zwei parallele Geleise neben einander liegen, und man will die Einrichtung treffen, dass die Züge von dem einen auf das andere übergehen können, so verbindet man sie durch ein drittes Geleise (Fig. 352). An jeder der beiden Vereinigungsstellen des Hilfsgeleises mit den Hauptgeleisen bringt man Wechsel an, mit Hilfe deren man die Züge in das Hilfsgeleise herüberleiten und auf das eine oder andere der beiden Hauptgeleise führen kann. Diese Wechsel sind mit Gegengewichten versehen, welche sie von selbst in solcher Stellung erhalten, dass sich die beiden Hauptgeleise unter denselben Umständen befinden, als wenn das Hilfsgeleise gar nicht vorhanden wäre.

§. 233. In den Bahnhöfen hat man oft Wägen von einem Geleise auf ein anderes zu schaffen, ohne den nöthigen Raum zur Verfügung zu haben, um ein Verbindungsgeleise, wie wir es eben beschrieben haben, anbringen zu können. In solchen Fällen bedient man sich der Drehscheiben, welche ausserdem auch noch dazu dienen, um Lokomotiven oder Wägen zu wenden. Dieses sind runde Tische von $3^1/_2$ bis $4\ /_2$ Meter Durchmesser, welche um einen in ihrer Mitte angebrachten Zapfen drehbar und dadurch

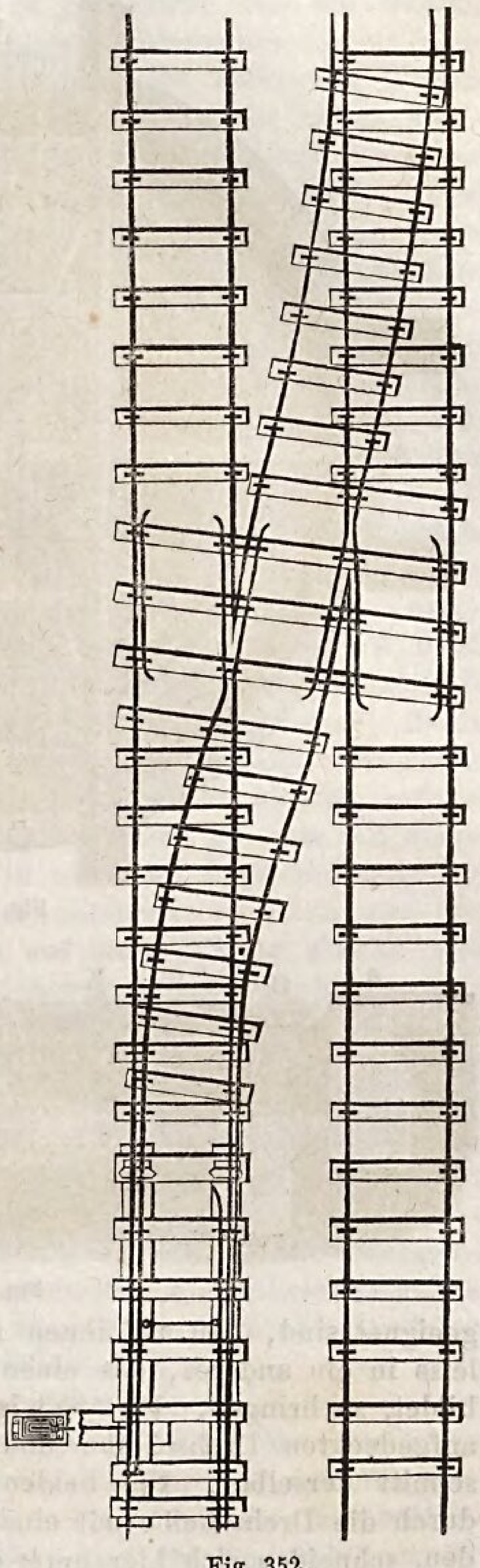


Fig. 352.

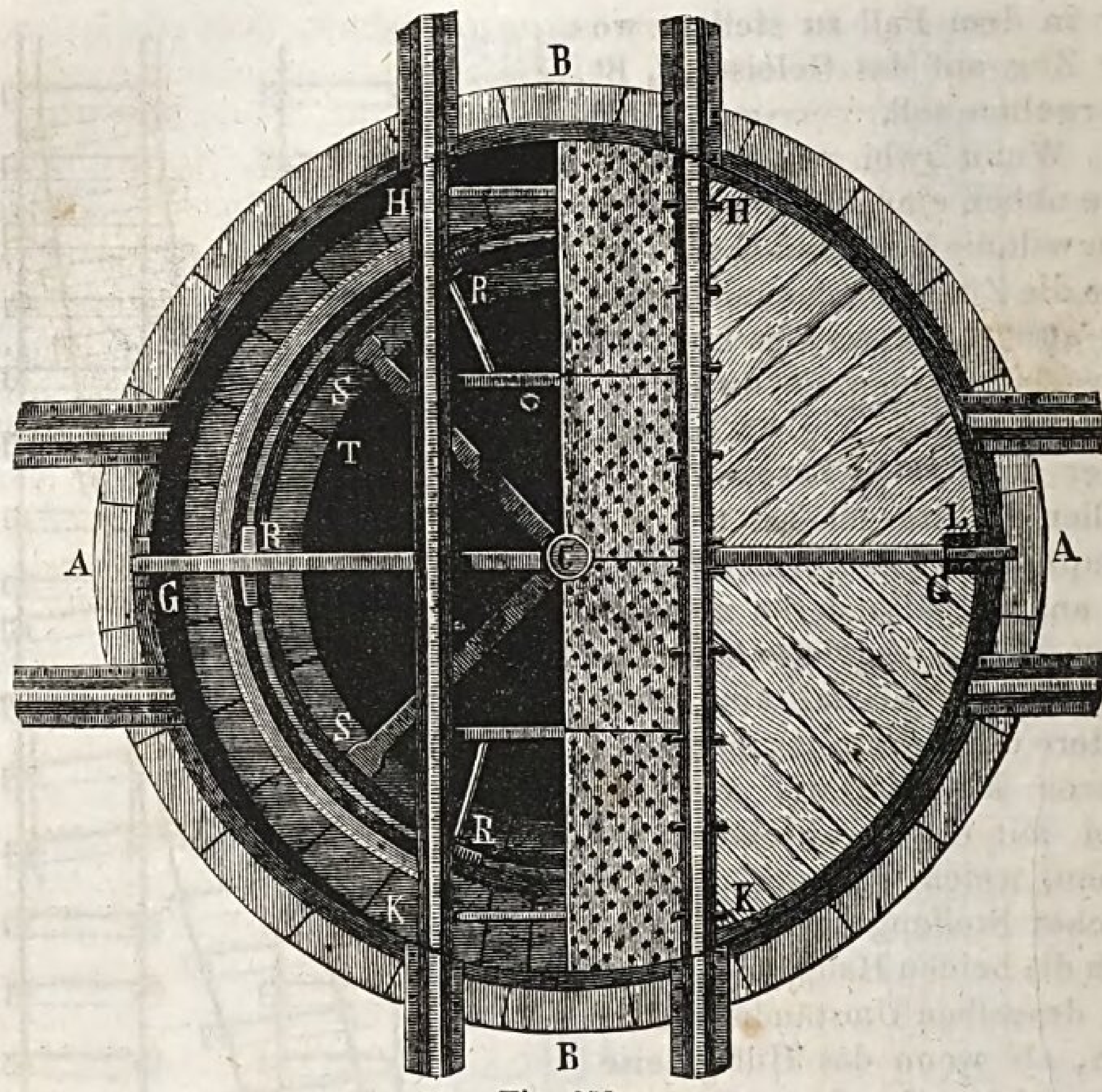


Fig. 353.

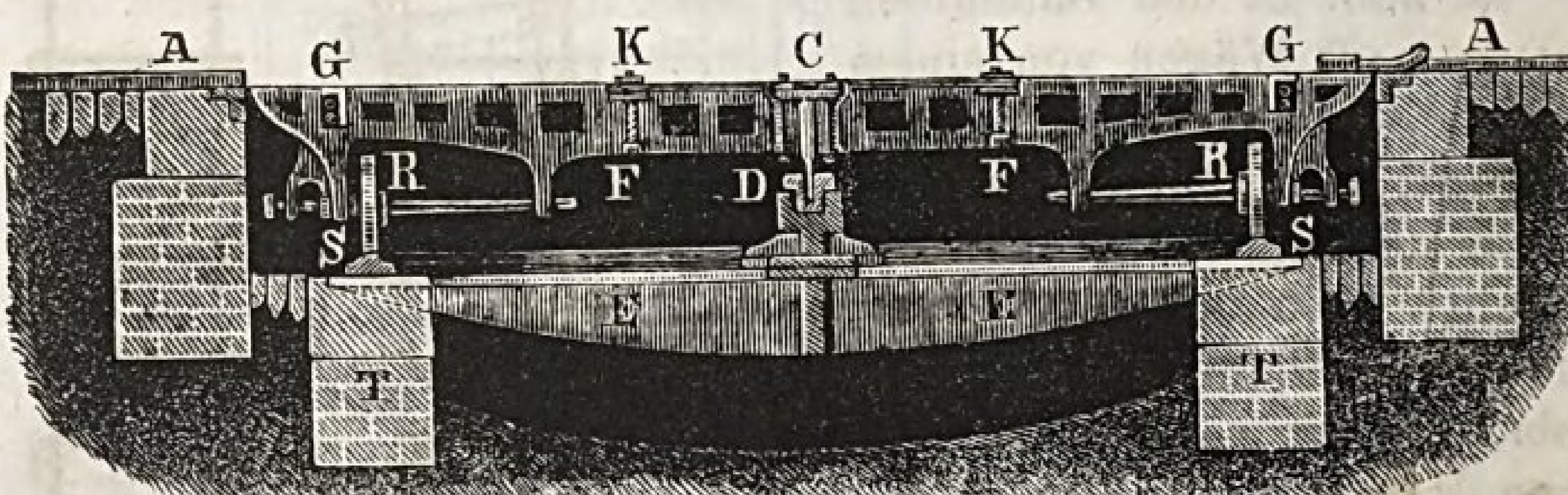


Fig. 354.

geeignet sind, den auf ihnen stehenden Wagen aus einem Geleise in ein anderes, das einen beliebigen Winkel mit ersterem bildet, zu bringen. Fig. 353 ist der Grundriss einer zur Hälfte aufgedeckten Drehscheibe und Fig. 354 ein vertikaler Durchschnitt derselben. Die beiden Geleise AA und BB, welche durch die Drehscheibe mit einander in Verbindung gesetzt werden, schneiden sich hier unter einem rechten Winkel. In Fig. 353

ist die Stellung der Drehscheibe so gezeichnet, dass ein Wagen, vom Geleise BB kommend, auf dieselbe übergehen kann; hierauf wird die Drehscheibe mit dem auf ihr stehenden Wagen gedreht, bis die Schienenstücke HK, HK auf ihr in die Richtung des Geleises AA zu stehen kommen, auf welchem dann der Wagen fortbewegt werden kann. Wenn sich am Ende dieses letzteren Geleises eine zweite Drehscheibe befindet, so kann mittelst derselben der Wagen auf ein zu BB paralleles Geleise gebracht werden.

Der vertikale Zapfen C der Drehscheibe bewegt sich in einer Pfanne D, welche auf einem starken gusseisernen vierarmigen Träger EE ruht (Fig. 354). Die Drehscheibe selbst besteht aus drei gusseisernen Rippen FK, FK und GG, wovon die ersten beiden zugleich als Stützen der Schienen HK, HK dienen; sie ist in der Mitte mit durchbohrten Gusseisenplatten und zu beiden Seiten mit Holzbohlen bedeckt. Um die Drehung der Scheibe sammt ihrer Belastung so leicht als möglich zu machen, unterstützt man sie noch an ihrem Umfang durch sechs Räder R, R, R u. s. w., deren Umdrehungsachsen nach der Achse des Stiftes C gerichtet sind, und deren Zapfenlager theils unmittelbar, theils mittelbar an den drei Hauptrippen der Drehscheibe festsitzen. Diese Räder laufen auf einer kreisrunden Eisenbahn SS, welche den gusseisernen Träger EE umschliesst und mit ihm auf demselben Fundament TT ruht. Will man die Zapfenreibung der Rollen R, R auf ihr Minimum zurückführen, so kann man die Drehscheibe selbst mittelst eines auf ihrer unteren Fläche aufgesetzten Kranzes auf den Frictionsrollen RR aufruhen lassen. Dann ist hauptsächlich nur der Widerstand des Rollens zwischen den Rollen und den sie umfassenden Kränzen zu überwinden.

Hieher gehören endlich noch die sog. Schiebebühnen, (Fig. 355), welche gleichfalls noch dazu dienen, einen Wagen von einem Geleise auf ein dazu paralleles zu bringen, und meist bei Ladehallen und Werkstätten angelegt sind. Die zu verbindenden Geleise werden durch eine senkrecht zu ihrer Längenrichtung laufende Grube durchschnitten, in welcher sich die Schiebebühne gewöhnlich auf 3 Paar Rädern auf 3 parallelen Schienensträngen bewegt. Die Schiebebühne trägt quer über die Grube, also parallel den zu verbindenden Geleisen und in gleicher Höhe mit diesen gelegen, ein Geleise. Man stellt die Schiebebühne so, dass ihr Geleise mit dem, auf welchem sich der zu verstellende Wagen befindet, übereinstimmt, und schiebt den Wagen auf sie. Sodann schiebt man die Schiebebühne mit

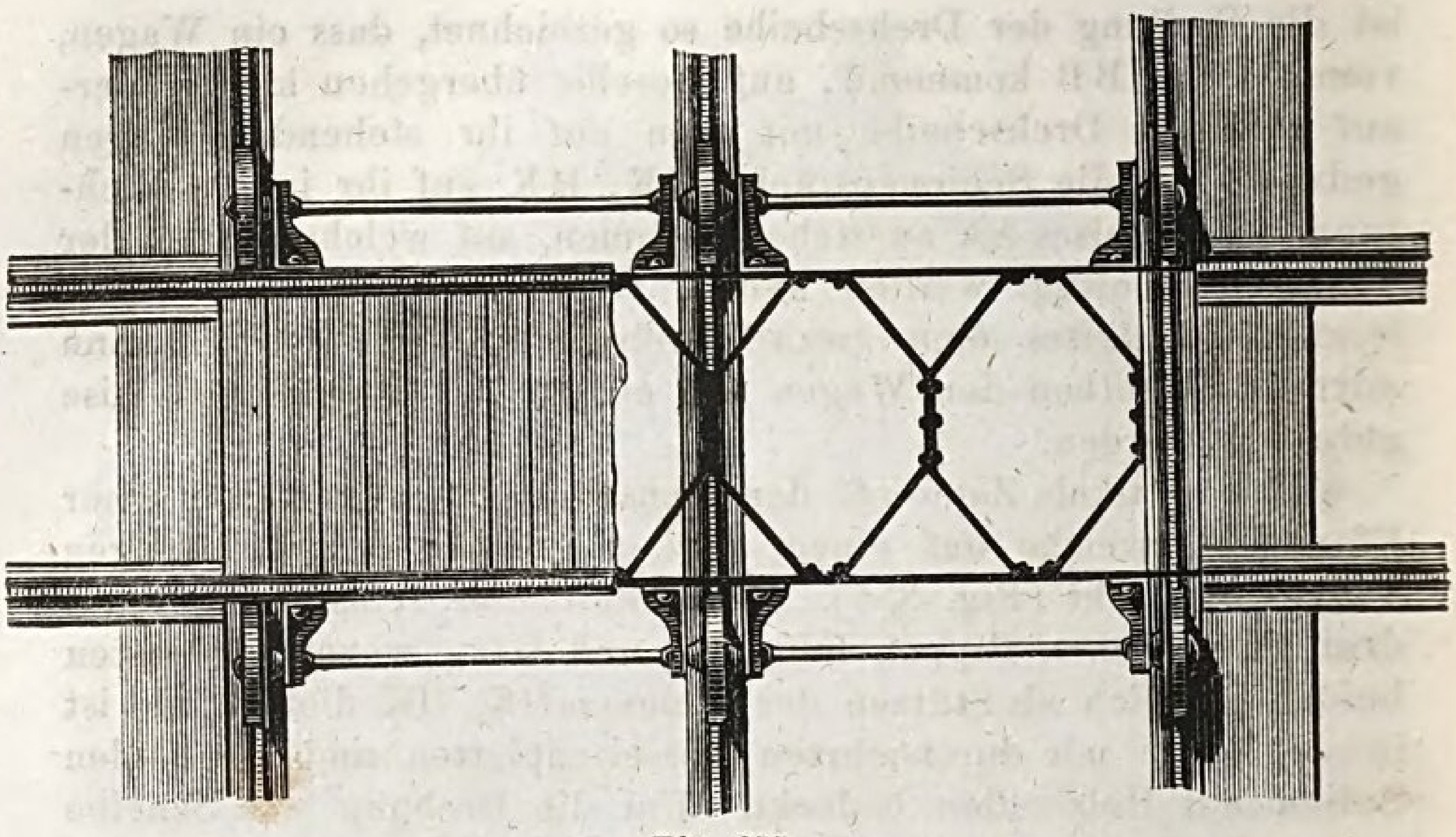


Fig. 355.

dem Wagen an dasjenige Geleise, worauf derselbe zu stehen kommen soll.

Die Bewegung der Schiebebühnen geschieht mittelst Schieben durch eine Anzahl von Arbeitern. Diese Arbeit wird sehr erleichtert durch eine ebenso einfache als sinnreiche Vorrichtung, ein Hebelwerk, welches der Bezirks-Maschinenmeister *Imhof* in Bamberg erdacht hat. Dasselbe kann ausserdem aber auch noch zum Verschieben der Locomotiven und schwerer Wägen, sowie zum Drehen der Drehscheiben verwendet werden.

Die Figuren 355^a und 355^b zeigen das *Imhof*'sche Hebelwerk in Auf- und Grundriss, wie es an einer Schiebebühne, die zum Verschieben von Lokomotiven dient, angebracht ist. An den Enden eines der Träger *aa*, mit welchem die Schiebebühne auf den Rädern ruht, ist der Hebelträger *bb* festgemacht. In demselben dreht sich die Achse *c* des Winkelhebels *dce*, an dessen kürzerem Ende *e* die Stelze *ef* mit angestähltem Fusse so angebracht ist, dass sie sich daselbst leicht um einen Bolzen drehen kann, während sie sich unten mit der scharfen Kante des Fusses gegen die Schiene stützt. In der in der Figur gezeichneten Lage muss sich die Stelze befinden, wenn die Schiebebühne durch Niederdrücken des Hebelarmes *d* in der Richtung des Pfeiles, rückwärts, bewegt werden soll. Nimmt aber die Stelze die Stellung ein, welche in der Figur blos durch einen einfachen Strich angedeutet ist, so wird durch dieselbe Manipulation mit dem Hebel die Schiebebühne vorwärts geschoben. Beide Stellungen

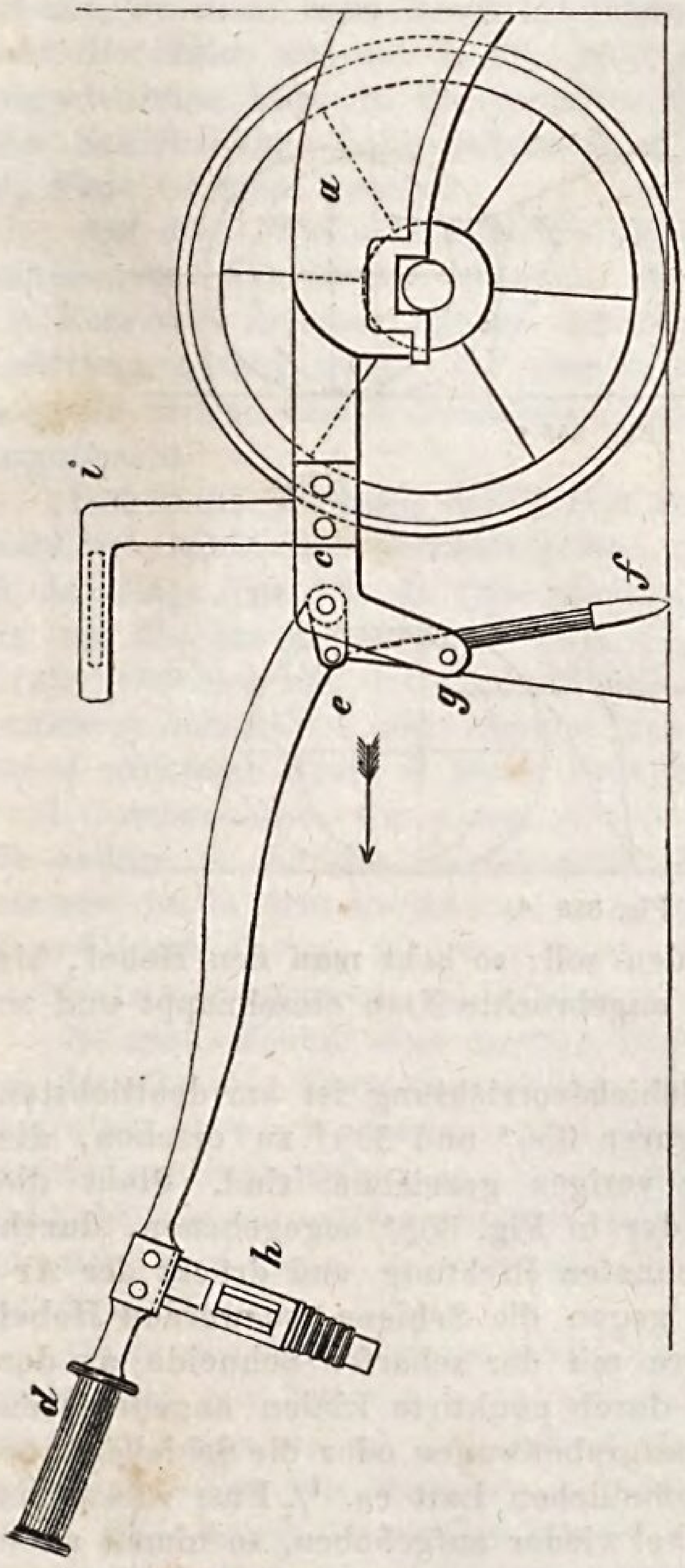


Fig. 355 a. (Maassstab 1 : 20.)

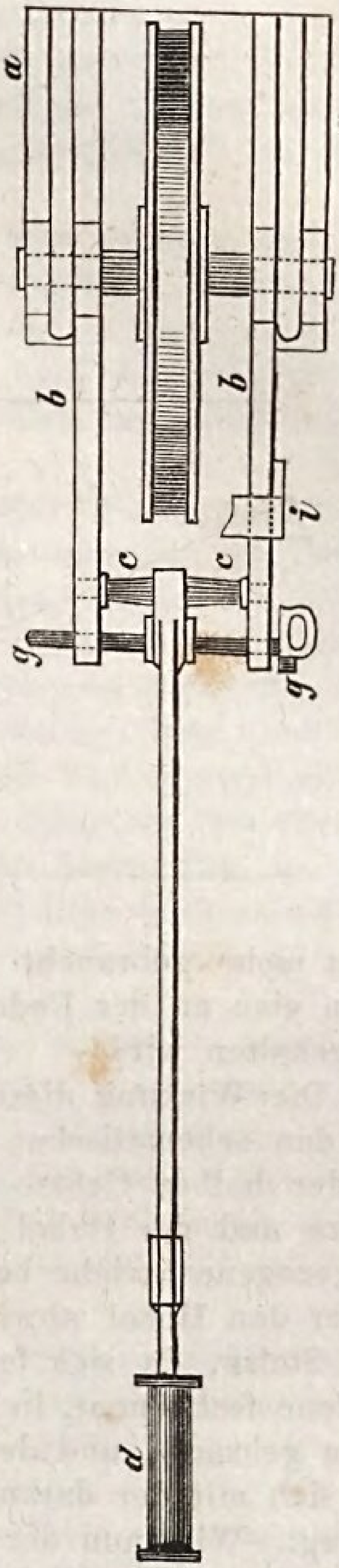


Fig. 355 b. (Maassstab 1 : 20.)

der Stelze werden durch die Richtungsstange *gg* gesichert. Der Wechsel von der einen in die andere wird durch Herausziehen dieser Stange an der in Fig. 355 b sichtbaren Handhabe ermöglicht. *h* ist ein Puffer, mit Gummiringen versehen, welcher die Hand des Arbeiters bei zufälligem Ausgleiten der Stelze gegen Verletzungen an der Schiene schützt. — Wenn das Hebelwerk

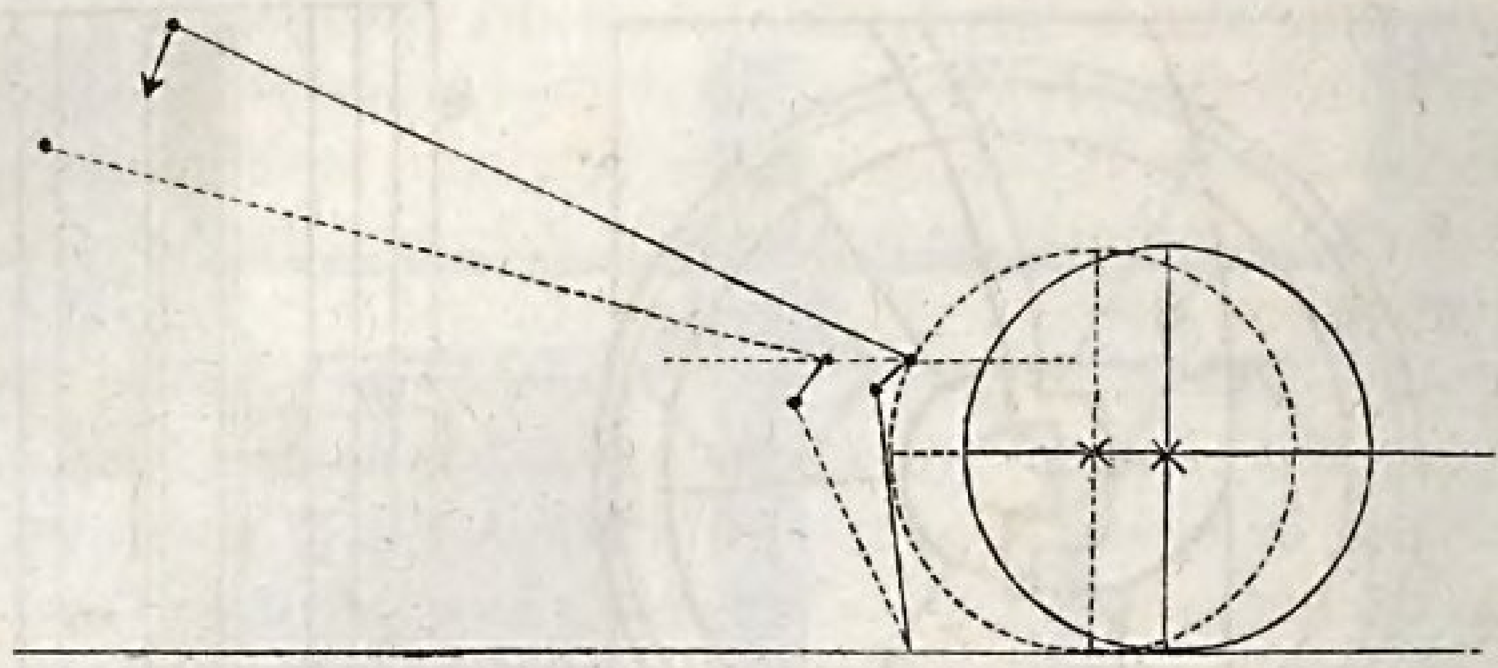


Fig. 355 c.

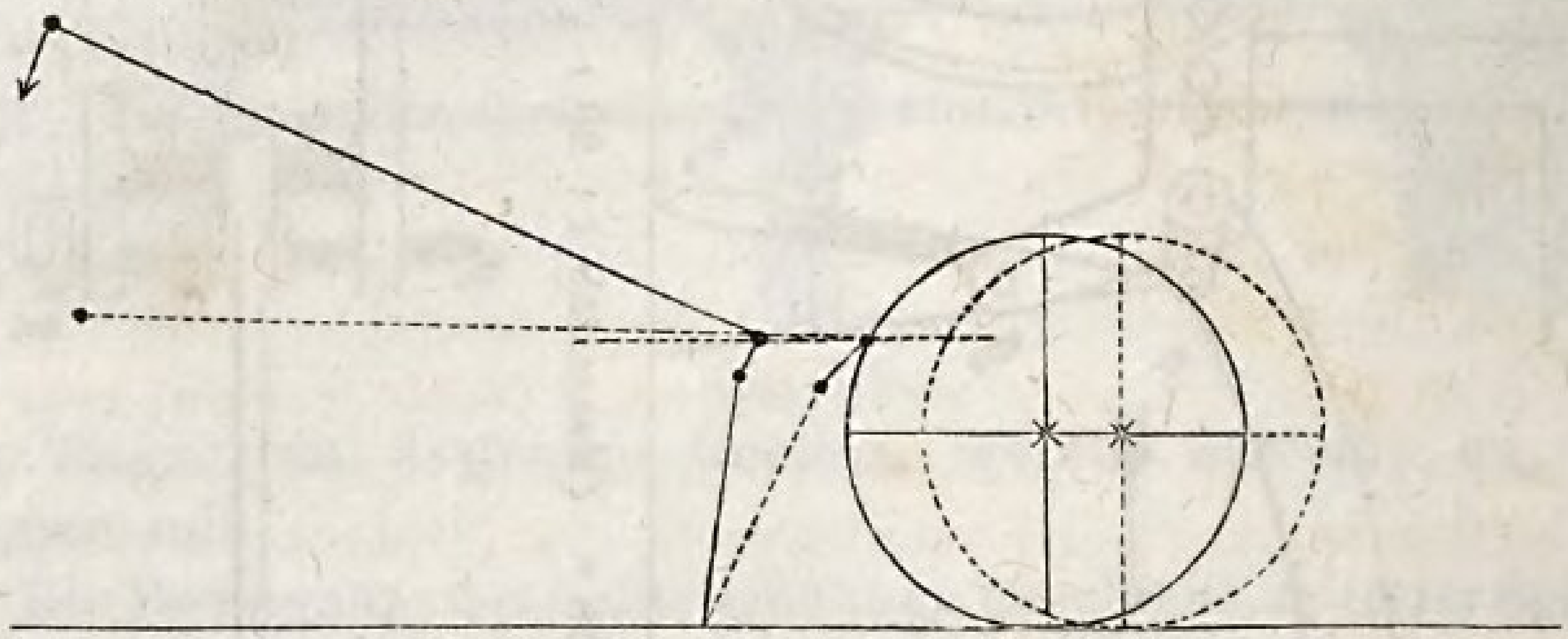


Fig. 355 d.

nicht mehr gebraucht werden soll, so hebt man den Hebel, bis er in eine an der Feder *i* angebrachte Nase einschnappt und so festgehalten wird.

Die Wirkung dieser Schiebevorrichtung ist am deutlichsten aus den schematischen Figuren 355^c und 355^d zu ersehen, die in der halben Grösse der vorigen gezeichnet sind. Steht die Stelze und der Hebel in der in Fig. 355^c angegebenen, durch ausgezogene Striche bezeichneten Richtung und drückt der Arbeiter den Hebel abwärts gegen die Schiene, so werden Hebel und Stelze, da sich letztere mit der scharfen Schneide an der Schiene feststemmt, in die durch punktirte Linien angedeuteten Lage gebracht, und der Laufgrabenwagen oder die Schiebebühne hat sich mit der darauf befindlichen Last ca. $^1/_2$ Fuss rückwärts bewegt. Wird nun der Hebel wieder aufgehoben, so nimmt auch die Stelze ihre vorige Stellung wieder ein, und beim Abwärtsdrücken des Hebels bewegt sich die Schiebebühne abermals um $^1/_2$ Fuss rückwärts u. s. f.

Soll die Schiebebühne sich vorwärts bewegen, so wird die Richtungsstange aus ihren Trägern herausgezogen, die Stelze in jene Stellung gebracht, welche in Fig. 355^a durch eine einfache Linie angedeutet ist, hierauf die Richtungsstange wieder einge-

steckt, wo dann beim Abwärtsdrücken des Hebels dieser letztere und die Stelze aus der in Fig. 355[a] durch ausgezogene Striche angedeuteten Lage in die punktirt angezeigte kommen und so die Schiebebühne beim jedesmaligen Abwärtsdrücken um circa $^1/_2$ Fuss vorwärts bewegt.

Auf diese Weise transportirt ein einziger Arbeiter eine Maschine von 600 Centner Gewicht ohne besondere Anstrengung 20 Fuss weit in einer Minute, während sonst 6 Mann zu dieser Leistung nöthig waren. — Gewöhnlich wird die Vorrichtung doppelt an den beiden äussersten Hinterrädern der Schiebebühne angebracht.

Ueber die Wirkung der Kräfte an dieser Vorrichtung kann man sich leicht Rechenschaft geben, wenn man sich die Stelze in der Lage, in der sie sich eben befindet, verlängert denkt, bis sie die am Hebelende *d* (Fig. 355[a]) wirkende verlängerte Kraft schneidet und von diesem Schnittpunkt nach dem Drehungspunkte *c* des Hebels eine Gerade zieht. Verlegt man dann die bei *d* wirksame Kraft in jenen Schnittpunkt und zerlegt sie in zwei Componenten, von denen eine in die Richtung der Stelze, die andere in die der zuletzt gezeichneten Linie fällt, so gibt letztere die in dem Punkt *c* an der Schiebebühne wirksame Zug- oder Schubkraft an, die man dann noch in eine vertikale und horizontale Componente zerlegen muss. —

Es gibt offenbar eine gewisse Richtung der Stelze und der bei *d* wirksamen Kraft, bei welcher der Wagen weder vor- noch rückwärts bewegt, sondern blos bei *c* gehoben wird. Man findet diese Stelzenrichtung, wenn man durch *e* eine Vertikale zieht, bis sie die verlängerte Richtung der bei *d* wirkenden Kraft schneidet und diesen Schnittpunkt mit *e* verbindet und darüber hinaus verlängert.

Wenn das Hebelwerk zum Verschieben von Lokomotiven und Wägen auf den Schienen gebraucht werden soll, so ist es noch etwas einfacher und so eingerichtet, dass es leicht an jenen angebracht und wieder abgenommen werden kann.

§. 234. Als Motoren, durch welche die Wagenzüge auf den Eisenbahnen fortbewegt werden, wendet man fast allgemein bewegliche Dampfmaschinen, sog. Lokomotiven an. Die Einrichtung dieser Maschinen können wir erst später kennen lernen. Für den Augenblick müssen wir uns damit begnügen, hervorzuheben, dass eine Lokomotive eine auf Räder gestellte Dampfmaschine ist, bei welcher die Wirkung des Dampfes ausschliesslich dazu angewandt wird, eine der Achsen zu drehen, an welchen jene Räder be-

festigt sind. Gewöhnlich wird eine Lokomotive von sechs Rädern, also von drei Achsen getragen. Wir setzen zunächst voraus, dass blos die mittlere Achse ihre Rotationsbewegung von der Maschine erhält. An dieser Bewegung müssen natürlich die Räder, welche an ihren beiden Enden befestiget sind, Theil nehmen. Die übrigen vier Räder dienen ganz einfach dazu, die Maschine tragen zu helfen und sie während ihrer Bewegung auf dem Geleise zu erhalten.

Setzen wir voraus, dass eine auf den Schienen stehende Lokomotive durch irgend ein Hinderniss an der Fortbewegung gehindert werde. Wenn der Dampf wirkt, so dreht er die mittlere Achse und mit ihr die beiden Räder an ihren Enden, die sogenannten Treibräder. Diese Räder müssen folglich auf den Schienen gleiten, woraus eine Reibung entsteht, welche um so grösser ist, je grösser der Druck ist, den sie gegen die Schienen ausüben. Wenn sich die Lokomotive frei fortbewegen könnte, so würde diese Reibung nicht entstehen. Die Treibräder würden rollen, anstatt zu gleiten, und die ganze Maschine mit sich fortziehen. Damit also die Maschine, trotz der Wirkung des Dampfes, stehen bleibt, muss sie einem Widerstand unterworfen werden, der mindestens gleich der Reibung ist, welche die Treibräder hervorbringen, wenn sie unter dem Drucke, welchen sie gegen die Schienen ausüben, auf diesen letzteren gleiten. Wenn der Widerstand, welcher an der Lokomotive wirkt, geringer als die eben genannte Reibung ist, so reicht er nicht hin, dieselbe stillstehend zu erhalten, und wird folglich durch sie überwunden. Daraus folgt, dass eine Lokomotive im Stande ist, eine Zugkraft auszuüben, welche höchstens gleich der Reibung ist, mit welcher die Treibräder an den Schienen gleiten würden, wenn die Lokomotive trotz der Wirkung des Dampfes gezwungen wird, stehen zu bleiben; an die Spitze eines Zuges gestellt, für welchen diese Zugkraft ausreicht, wird die Lokomotive denselben offenbar fortbewegen.

Die Zugkraft, welche eine Lokomotive auszuüben im Stande ist, hängt also wesentlich von dem Drucke ihrer Treibräder gegen die Schienen ab. Allerdings muss auch die Dampfmaschine die nöthige Stärke besitzen, aber ihre Kraft kann sich auf den Zug nur mittelst der Adhäsion der Treibräder an den Schienen übertragen; die Dampfmaschine könnte eine sehr grosse Stärke besitzen und doch nicht im Stande sein, mehr als eine mittelmässige Zugkraft auszuüben, wenn ihr Gewicht zu gering wäre, um den gehörigen Druck der Treibräder gegen die Schienen hervorbringen zu können.

Wir haben oben (§. 66) gesehen, dass in dem Fall, wo sich ein schwerer Körper in mehr als drei Punkten, oder auch nur in drei Punkten, die in gerader Linie gelegen sind, gegen eine Horizontalebene stützt, der Druck, welcher in den verschiedenen Unterstützungspunkten ausgeübt wird, nicht allein von seinem Gewicht und von der Lage seines Schwerpunktes gegen jene Unterstützungspunkte abhängig ist, sondern dass jene Drückungen auch von der grösseren oder geringeren Biegsamkeit der verschiedenen Theile des Körpers sowie der Ebene, auf welcher er aufruht, abhängen. Dies findet hier bei einer Lokomotive Anwendung, welche in sechs Punkten, den Berührungspunkten ihrer Räder mit den Schienen, unterstützt ist. Die Räder tragen das Gewicht der ganzen Maschine mittelst Federn, und der auf eines dieser Räder ausgeübte Druck ist daher um so grösser, je stärker die diesem Rade entsprechende Feder ist. Man bringt desshalb an den Treibrädern sehr starke Federn an, um auf dieselben einen grossen Theil des Totalgewichtes der Maschine zu übertragen; andererseits construirt man die Maschine so, dass sie ein bedeutendes Gewicht erhält; auf diese Weise erzeugt man eine grosse Adhäsion der Treibräder an den Schienen, sodass die Maschine im Stande ist, eine bedeutende Zugkraft auszuüben. Man kann das Gewicht einer Lokomotive, so wie sie jetzt gebaut werden, auf ungefähr 25000 — 30000 Kilogramm anschlagen.

Um die Zugkraft einer Lokomotive zu erhöhen, verbindet man häufig die Treibräder mit zwei, ja sogar mit vier von den andern Rädern mittelst Stangen, welche in Krummzapfen an den Achsen dieser Räder befestigt sind (Fig. 356). Räder, welche auf diese Weise mit einander verbunden sind, nennt man **gekuppelte Räder**. In Folge dieser Kuppelung können sich die Treibräder nicht drehen, ohne dass sich zu gleicher Zeit diejenigen mit herum bewegen, mit denen sie gekuppelt sind. Das Maximum

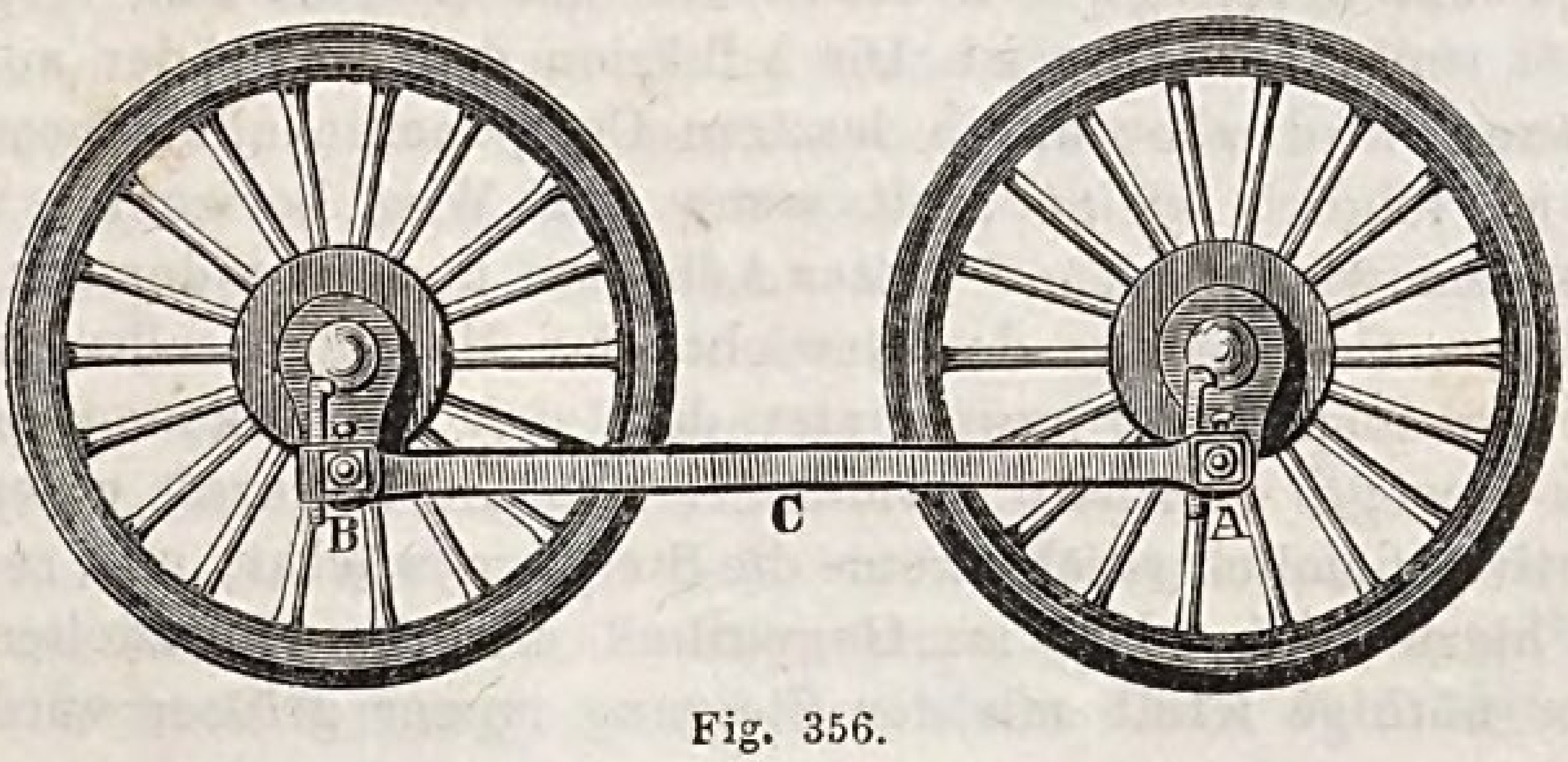


Fig. 356.

der Zugkraft der Maschine wird also nicht blos durch die Adhäsion der Treibräder, sondern vielmehr durch die Adhäsion sämmtlicher gekuppelter Räder an den Schienen bestimmt. Hiebei ist zu bemerken, dass natürlich nur Räder von gleichem Durchmesser gekuppelt werden können, weil sie in derselben Zeit dieselbe Anzahl von Umdrehungen machen müssen.

Wenn sämmtliche Räder einer Lokomotive, deren Gewicht 25000 Kilogramm beträgt, gekuppelt sind, so kann man rechnen, dass ihre Zugkraft 2500 Kilogramm im Maximum ist, weil beim Gleiten von Eisen auf Eisen das Verhältniss der Reibung zum Druck nicht viel unter 0,1 ist. Angenommen, dass diese Kraft an einem Zug wirke, dessen Achsen sämmtlich gut geschmiert sind, sodass die erforderliche Zugkraft nur 0,005 seines Gewichts beträgt, (§. 228), so sieht man leicht, dass die Lokomotive im Stande ist, auf horizontaler Bahn einen Zug von 500000 Kilogramm Gewicht fortzuziehen.

§. **235.** Die Eisenbahnen sind selten auf grosse Strecken horizontal; gewöhnlich sind sie eine Aufeinanderfolge von horizontalen Strecken, welche durch Stellen, die in dem einen oder andern Sinn geneigt sind, von einander getrennt werden. Die Wagenzüge müssen daher sehr häufig grössere oder kleinere Steigungen hinaufbefördert werden, und ihr Gewicht darf folglich nicht so gross sein, als eben gefunden wurde. Wir wissen, dass dies von der zum Wege parallelen Componenten des Gewichts herrührt, welche auf Steigungen einen Theil der Zugkraft absorbirt, welche die Maschine ausüben kann.

Zu derselben Zeit, wo die zum Fortziehen eines Eisenbahnzuges nöthige Kraft wächst, wenn er von einem horizontalen Theil der Bahn auf eine Steigung übergeht, wird die Zugkraft, welche die Lokomotive ausüben kann, vermindert. Wir wissen ja, dass sich auf geneigter Bahn das Gewicht derselben in zwei Componenten zerlegt, von denen die eine parallel zum Weg, die andere senkrecht dazu ist. Die Adhäsion der Treibräder auf den Schienen wird aber durch letztere Componente allein bestimmt und ist folglich kleiner, als wenn der Weg horizontal wäre; ausserdem wird ein Theil dieser Adhäsion noch von der zur Bahn parallelen Componente des Gewichts der Maschine selbst in Anspruch genommen, vorausgesetzt dass sich die Lokomotive aufwärts bewegt. Desshalb vermindert sich die Zugkraft einer Lokomotive ziemlich rasch, wenn die Steigung wächst; und rechnet man hiezu noch, dass im Gegentheil die zum Fortziehen des Zuges nöthige Kraft mit der Steigung immer grösser wird, so

ist leicht zu begreifen, dass beim Bau der Eisenbahnen starke Neigungen vermieden werden müssen.

Es ist nicht schwer, die Frage zu beantworten, welches Maximum der Steigung eine Eisenbahn nicht überschreiten darf, damit eine Lokomotive noch im Stande ist, im Ansteigen eine gewisse Last mit fortzuziehen. Denken wir uns eine Lokomotive, deren sämmtliche Räder gekuppelt und zugleich so befestigt sind, dass sie sich nicht drehen können. Wenn diese Lokomotive auf eine geneigte Bahn gestellt wird und sie bleibt auf derselben in Ruhe, ohne über sie herunter zu gleiten, so darf man sicher sein, dass sie durch die Wirkung des Dampfes die schiefe Ebene aufwärts bewegt wird, wenn ihre Räder wieder beweglich gemacht werden. Damit aber die Maschine mit ihren festgemachten Rädern unter der Wirkung ihres Gewichtes nicht über die schiefe Ebene herabgleitet, darf das Verhältniss der Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Basis nicht grösser als das Verhältniss der Reibung zu dem Druck, also nicht grösser als der Reibungscoëfficient beim Gleiten von Eisen auf Eisen sein. Wenn das erste Verhältniss gerade gleich dem zweiten ist, so kann sich zwar die Lokomotive selbst, nachdem ihre Räder frei gemacht worden sind, eben noch aufwärts bewegen, aber sie ist nicht im Stande, ausserdem irgend eine Zugkraft auf andere Körper auszuüben; wenn aber das erste Verhältniss kleiner als das zweite ist, so ist die Last, welche die Lokomotive mit fortziehen kann, um so grösser, je grösser die Differenz jener Verhältnisse ist.

Eine der grössten bei Eisenbahnen vorkommenden Steigungen ist die, welche der Theil der Eisenbahn zwischen Paris und St. Germain, der in der Nähe der letzteren Stadt liegt, besitzt. Derselbe bildet eine schiefe Ebene, deren Neigung 1^m auf $28^m,6$ beträgt. Man bediente sich daselbst früher des Systems der atmosphärischen Eisenbahnen, die wir später kennen lernen werden. Die grösste Steigung, die noch mit Lokomotiven befahren wird, kommt auf der Bahn Genua-Turin vor und beträgt ebenfalls 1^m auf $28^m,6$. Die Steigung der Bahn über den Sömmering beträgt vorherrschend 1^m auf 40^m, im Maximum 1^m auf 36^m; sie erfordert schon Maschinen von ganz besonderer Stärke und eigenthümlicher Construction.

Bei solchen und noch grösseren Steigungen bedient man sich mit Vortheil der sog. Seileisenbahnen, wo der Zug mit Hilfe eines Seiles, das durch eine feststehende Dampfmaschine bewegt wird, die schiefe Ebene hinaufgezogen wird. — Ein eigenthümliches Mittel will man jetzt auf dem Mont-Cenis anwenden, um

bis zur Vollendung des grossen Tunnels durch diesen Berg die Verbindung zwischen den beiderseits dort ausmündenden Bahnen durch eine provisorische Hilfsbahn längs der schon bestehenden Strasse herzustellen. Um die vorkommenden starken Steigungen zu überwinden, baut man Lokomotiven, die ausser den gewöhnlichen noch zwei horizontal liegende Treibräder haben. Diese letzteren werden beiderseits an einen zwischen ihnen durchlaufenden dritten Schienenstrang angedrückt, der mitten in dem gewöhnlichen Geleise und etwas über dasselbe erhöht liegt. Dadurch wird natürlich die Adhäsion der Maschine und damit ihre Zugkraft bedeutend erhöht.

§. 236. Einer der bedeutendsten Vortheile der Eisenbahnen vor den gewöhnlichen Strassen besteht in der Schnelligkeit der Bewegung, welche man den Wagenzügen geben kann. Dieser Vortheil entspringt aus der Anwendung des Dampfes, statt der Pferde, als Motor. Ein Pferd, das vor einen Wagen gespannt ist, kann demselben keine grössere Geschwindigkeit geben, als diejenige, welche es annehmen kann, wenn es ganz ohne Belastung frei dahin läuft; und selbst in diesem günstigsten Fall darf man es nicht mit der ganzen Geschwindigkeit, deren es fähig ist, laufen lassen, um es nicht zu bald zu ermüden. Mit einer Dampfmaschine von gehöriger Stärke dagegen kann man die Geschwindigkeit eines Zuges fast beliebig vergrössern. Denn wenn auch die Dampfmaschine, um möglichst vortheilhaft zu arbeiten, die Achse der Treibräder nur mit einer Geschwindigkeit herumdrehen darf, welche eine gewisse Grenze nicht überschreitet, so darf man doch nur den Durchmesser dieser Räder vergrössern, damit die Schnelligkeit des Zuges eine bestimmte Grösse erhält; denn es ist klar, dass bei jeder Umdrehung der Treibachse der Zug um eine Länge gleich dem Umfang eines Treibrades fortschreitet. Die mittlere Geschwindigkeit, mit welcher sich durchschnittlich die Züge auf den deutschen Eisenbahnen bewegen, beträgt $8-12^{m}$ (bei Güterzügen) bis $16-20^{m}$ (bei Eilzügen) in der Secunde; mit Einrechnung der Anhaltzeit an den Stationen vermindern sich natürlich jene Zahlen entsprechend.

§. 237. Um die in Bewegung befindlichen Züge zum Stillstand zu bringen, hebt man die Wirkung des Dampfes auf und bedient sich der Bremsen, mit deren Hilfe man die passiven Widerstände vermehrt. Diese Bremsen sind etwas anders eingerichtet als bei gewöhnlichen Wägen, aber sie wirken in ähnlicher Weise wie dort, indem sie an dem Umfang der Räder eine

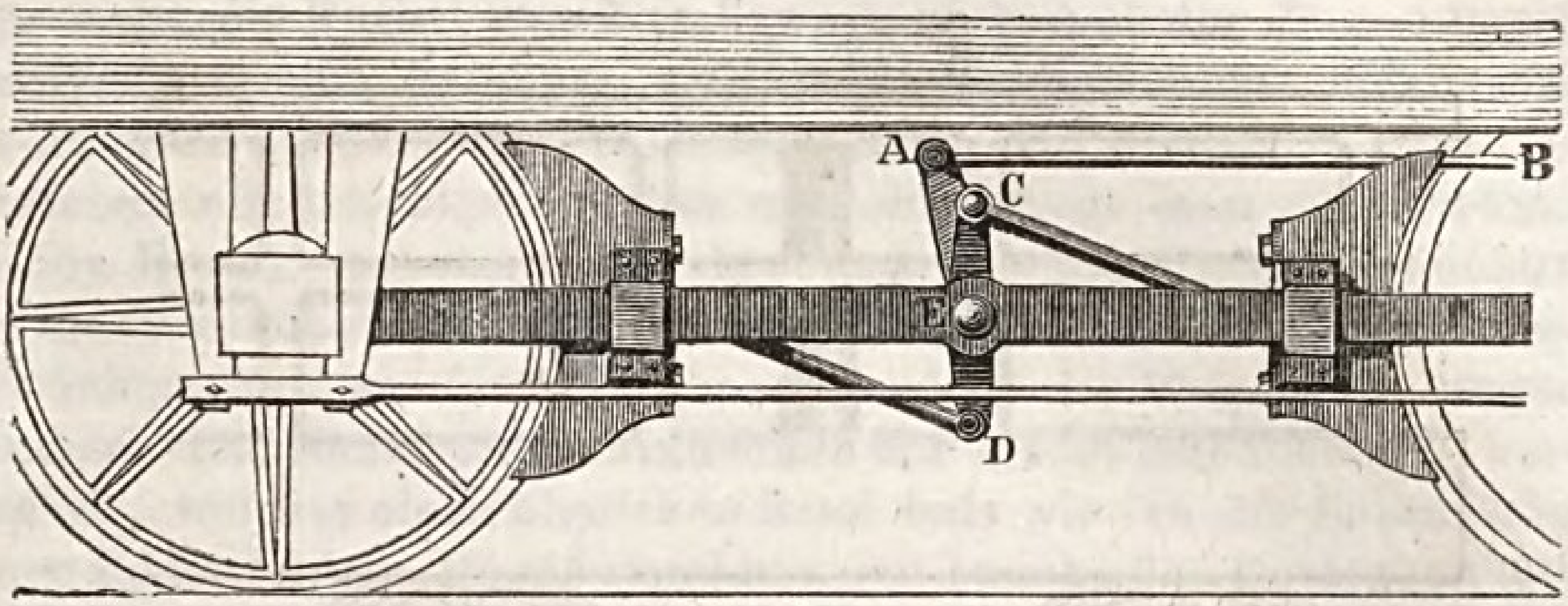


Fig. 357.

Reibung hervorbringen. Sie bestehen gewöhnlich aus zwei Stücken Holz beiderseits, welche zwischen den beiden Räderpaaren eines und desselben Wagens angebracht werden (Fig. 357) und so geformt sind, dass sie einen Theil des Umfangs der Räder umfassen. Eine Eisenstange AB ist so angebracht, dass man mit ihr den Hebel CD um die Achse E drehen kann; zu diesem Behuf ist diese Stange mit einem an derselben Achse E befestigten Hebelarm so verbunden, dass sie sich um den Punkt A frei drehen kann. Wenn sie daher in der Richtung von A nach B hinübergezogen wird, so drücken die beiden Eisenstäbe, welche einestheils in C und D an den Enden des Hebels CED, anderntheils an den beiden Holzstücken, welche die Bremse bilden, befestigt sind, diese letzteren gegen den Umfang der Räder, wodurch die beabsichtigte Vermehrung der passiven Widerstände hervorgerufen wird.

Diese Art von Bremsen, welche fast allgemein angewendet werden, leiden an demselben Mangel wie die Bremsen an den gewöhnlichen Wägen. Wenn man sie so stark andrückt, dass sie die Räder verhindern sich zu drehen, so gleiten diese auf den Schienen; dabei nützen sie sich immer nur an einzelnen Punkten ihres Umfanges ab und werden daher bald unrund. Um diesen Uebelstand zu beseitigen, hat *Laignel* vorgeschlagen, die gewöhnlichen Bremsen durch solche zu ersetzen, wie sie in Figur 358 und 359 abgebildet sind. Diese Bremsen bestehen, so zu sagen, aus zwei Hemmschuhen, welche auf beiden Seiten eines Wagens zwischen den Rädern desselben angebracht werden. Für gewöhnlich sind dieselben ausser Berührung mit den Schienen. Wenn man aber die Bremse in Wirksamkeit setzen will, so dreht man mittelst einer Kurbel eine Schraube in der passenden Richtung; dadurch hebt sich die Schraubenmutter, in welche jene Schraube eingreift, und diese

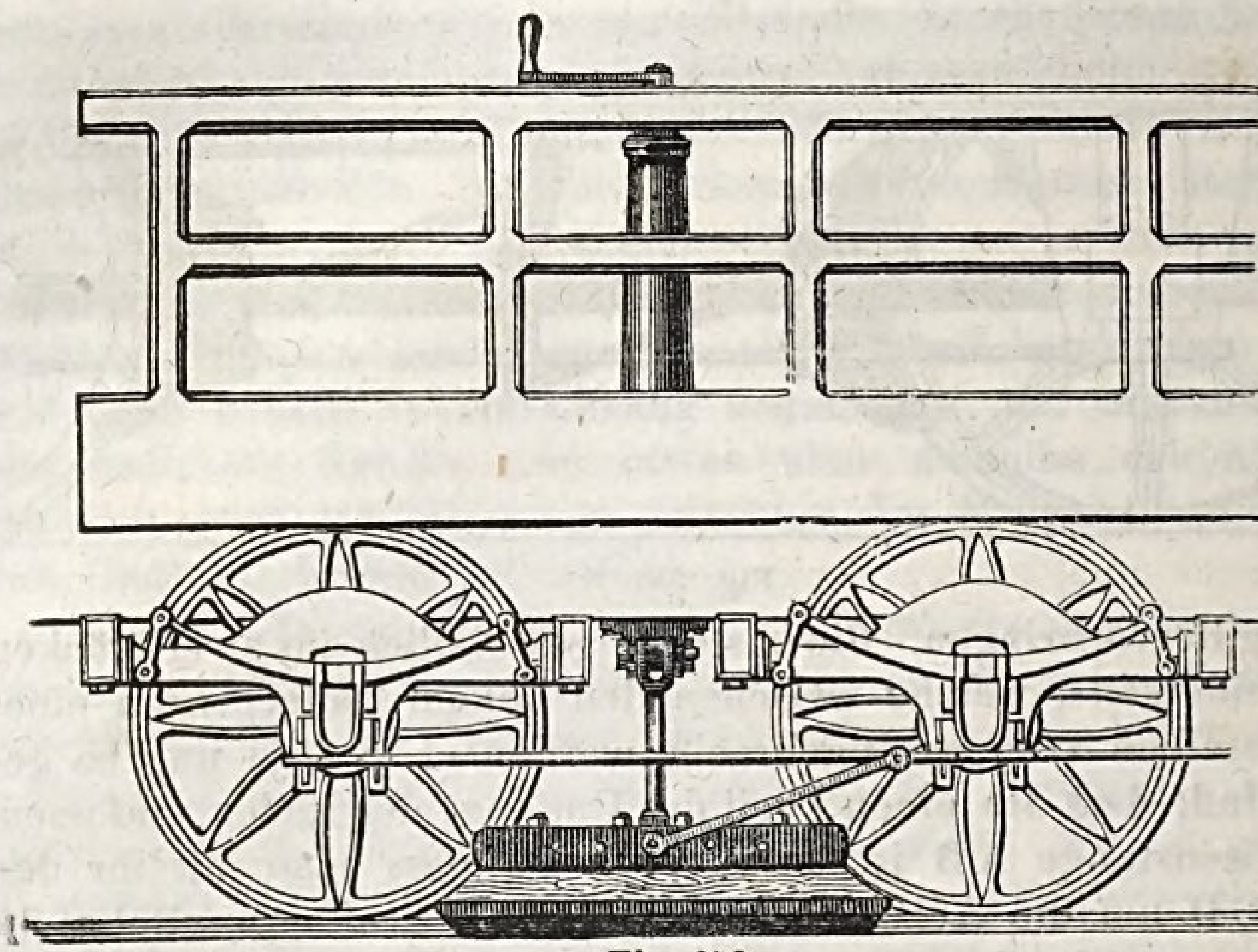


Fig. 358.

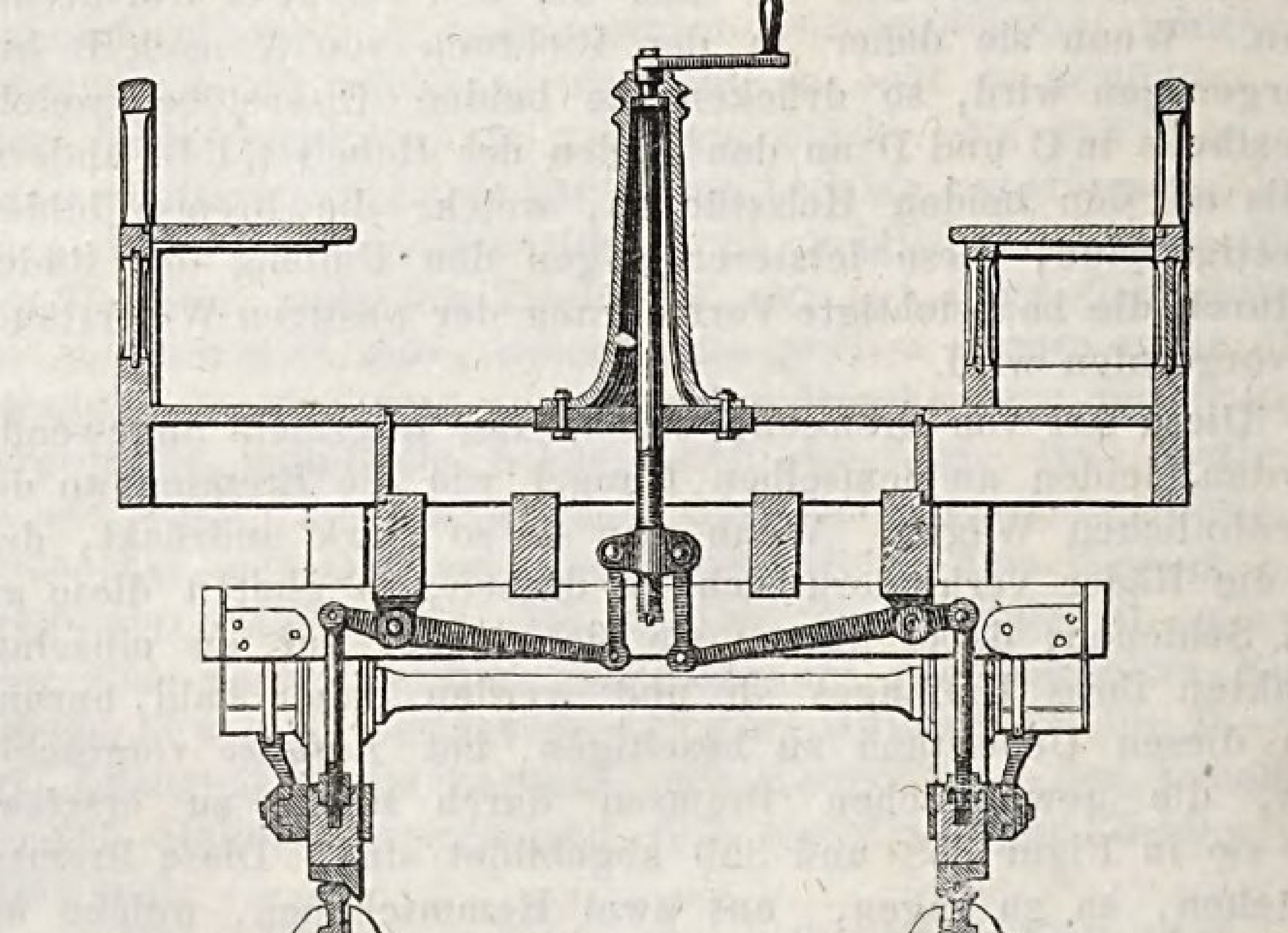


Fig. 359.

drückt nun ihrerseits mittelst zweier Hebel (s. Fig. 359) die beiden Hemmschuhe gegen die Schienen nieder. Der Druck dieser Hemmschuhe gegen die Schienen wird natürlich um so stärker,

je mehr die Kurbel vorwärts bewegt wird, und aus diesem Druck entspringt eine Reibung, welche die Bewegung des Wagens zu verzögern sucht. Diese Reibung kann fast dieselbe Stärke erreichen als diejenige, welche entsteht, wenn man die gewöhnliche Bremse so stark anzieht, dass sie die Räder verhindert, sich zu drehen; man darf nur die Hemmschuhe so stark niederdrücken, dass sie fast das ganze Gewicht des Wagens zu tragen haben. Die Hemmschuhe sind unten mit einem Eisenbeschlag versehen, welcher einen ähnlichen Rand hat, wie ihn die Spurkränze der Räder bilden. Dieser Rand hat den Zweck, das Entgleisen der Wägen zu der Zeit zu verhindern, wo die Bremse in Thätigkeit gesetzt ist, und wo sich die Räder fast nicht mehr gegen die Schienen stützen. — Die Bremse von *Laignel* ist mit Vortheil auf mehreren Eisenbahnen angewandt worden, namentlich auf der schiefen Ebene von Liège.

§. 238. Der Widerstand, welcher sich der Bewegung der Wägen auf einer Eisenbahn entgegensetzt, ist ein so kleiner Bruchtheil ihres Totalgewichtes, dass die Neigung der Bahn nicht sehr gross zu sein braucht, damit die Wägen dieselbe unter der Wirkung ihres eigenen Gewichtes hinablaufen. Es reicht hiezu bekanntlich aus, dass die zur Bahn parallele Componente des Gewichts im Stande ist, die passiven Widerstände, welche sich der Bewegung entgegensetzen, zu überwinden. Desshalb findet man auf den Eisenbahnen nicht selten Strecken, wo die Neigung, ohne besonders stark zu sein, hinreicht, die Bewegung der Wägen zu erhalten, ohne dass der Dampf mehr wirkt; man ist in solchen Fällen sogar manchmal genöthigt, sich der Bremsen zu bedienen, um zu verhindern, dass die Geschwindigkeit zu gross wird. Eine in dieser Beziehung interessante Bahn ist die von Augsburg nach Lindau; ein grosser Theil derselben wird ohne Dampf befahren, nämlich von Günzach bis Wilpoltsried (2,68 Wegstunden), von Betzigau bis Kempten (1,55 Stunden) und ferner von Oberstaufen bis Lindau (15 Stunden); auf dem Rückwege von Oberstaufen bis Kempten (3 Stunden) und von Günzach bis Biessenhofen (5 Stunden). Die Steigung auf diesen verschiedenen Stellen ist mit kurzen Abwechslungen fast immer 1^m auf 100^m, die geringste 1^m auf 150^m. Je schwerer die Züge sind, desto mehr müssen die Bremsen in Anwendung kommen, zumal diese Strecken bedeutende Curven enthalten. Bei Regenwetter, wo eine geringe Reibung zwischen Rädern, Schienen und Bremsen herrscht, muss im Nothfall, also bei zu grosser Geschwindigkeit, der Lokomotivführer Sand auf die Geleise aus seiner Maschine

streuen. Aehnliche Verhältnisse finden auch auf der schon oben berührten schiefen Ebene der Bahn von Paris nach St. Germain statt. Die Züge, welche von St. Germain abgehen, laufen die ganze schiefe Ebene unter der alleinigen Wirkung ihres Gewichtes herab, und erst am Ende dieser schiefen Ebene werden sie mit einer Lokomotive verbunden, um nach Paris geführt zu werden.

§. 239. **Selbstwirkende schiefe Ebenen.** — Wenn Wägen längs einer geneigten Eisenbahn beladen hinabgehen und unbeladen denselben Weg wieder herauf gefördert werden sollen, so kann man die abwärts gehenden beladenen Wägen benützen, um die leeren Wägen wieder herauf zu ziehen. Zu diesem Behufe befestigt man den beladenen Wagen an dem einen, den leeren an dem andern Ende eines Seils, welches man um eine grosse Rolle mit vertikaler Achse schlingt, die oben an der schiefen Ebene aufgestellt ist (Fig. 360 und 361). Die beiden Theile des Seils nehmen, nachdem sie die Rolle verlassen haben, die Richtung der Mittellinie der beiden parallelen Geleise an, auf welchen sich bezüglich der volle und der leere Wagen bewegen müssen. Die Schwere sucht sowohl den beladenen als den unbeladenen Wagen die schiefe Ebene hinab zu bewegen, woran sie aber durch das dieselben verbindende Seil gehindert wird. Zerlegen wir wieder, wie es schon mehrmals geschehen ist, das Gewicht der Wägen in zwei Componenten, von denen die eine parallel, die andere senkrecht zur schiefen Ebene ist. Die ersteren sind es, welche wir uns an den beiden Enden des Seils wirkend denken müssen und von welchen es hauptsächlich abhängt, ob Gleichgewicht oder Bewegung stattfindet, und in letzterem Fall, in welchem Sinne die Bewegung geschieht. Wenn die Wägen an beiden Enden des Seils gleich schwer wären, so würden jene Componenten gleich gross sein und das Seil müsste in Ruhe bleiben. Aber wenn der Wagen auf der einen Seite beladen, der auf der andern Seite leer ist, so übertrifft die Componente des Gewichts des ersteren diejenige des zweiten; der beladene Wagen muss sich also abwärts bewegen und den leeren aufwärts ziehen.

Die so hervorgebrachte Bewegung ist ganz analog derjenigen, welche wir bei der *Atwood*'schen Fallmaschine betrachtet haben (§. 112). Die Geschwindigkeit müsste sich also fortwährend vergrössern, wenn man nicht dafür sorgen würde, sie mittelst einer Bremse, welche an der grossen Rolle angebracht ist, zu mässigen. Diese Bremse besteht aus zwei Backen von Holz A, A, deren

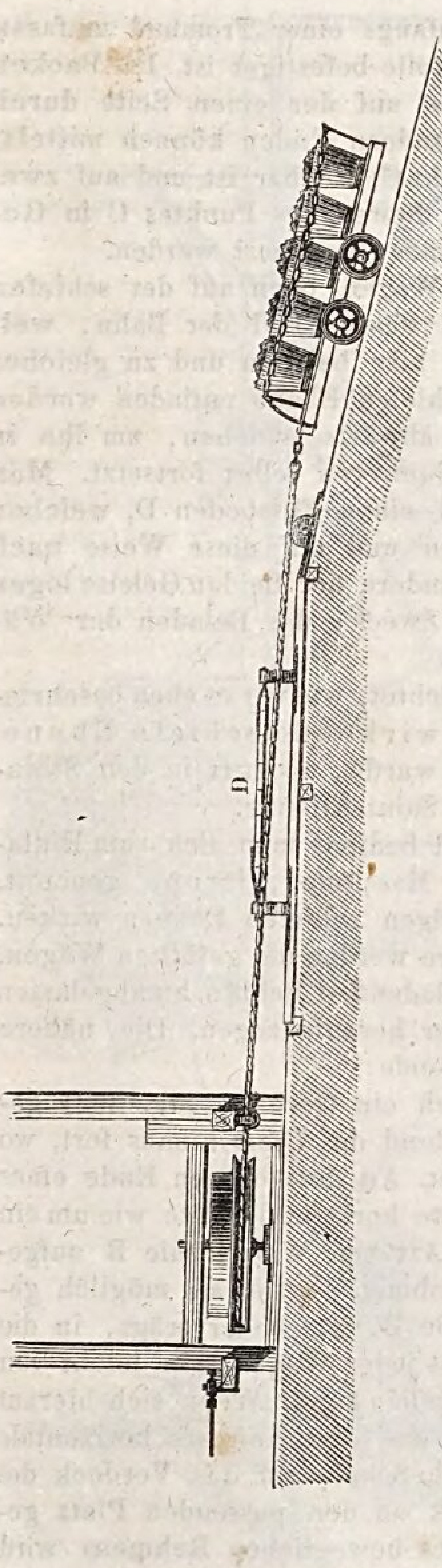


Fig. 360.

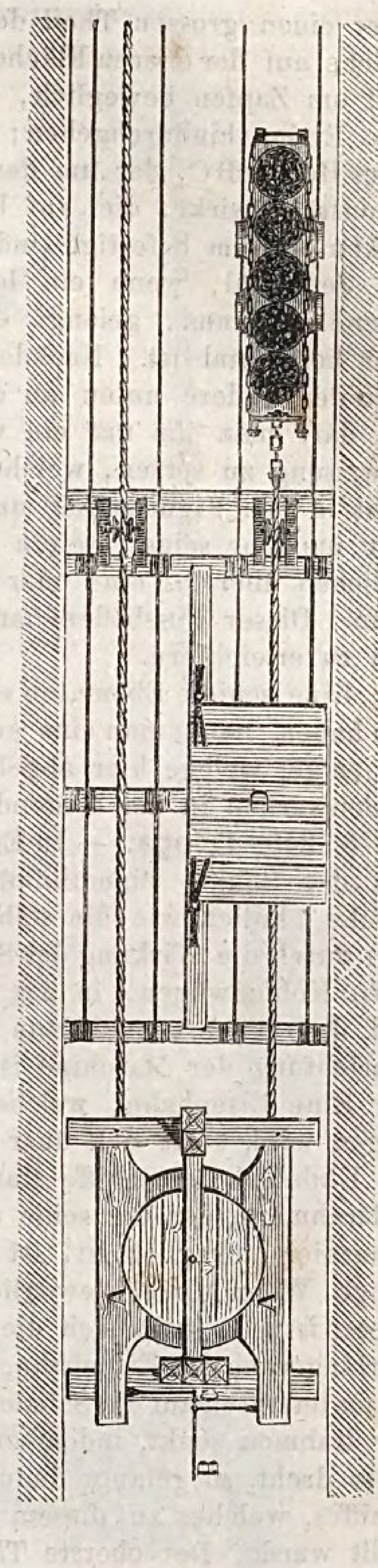


Fig. 361. (Maassstab 9 : 1000.)

jeder einen grossen Theil des Umfangs einer Trommel umfasst, welche auf der oberen Fläche der Rolle befestiget ist. Die Backen sind um Zapfen beweglich, welche auf der einen Seite durch ihre Enden hindurchgehen; ihre andern Enden können mittelst eines Hebels BC, der um den Punkt C drehbar ist und auf zwei Eisenstäbe wirkt, die auf beiden Seiten des Punktes C in Gelenken an ihm befestigt sind, einander genähert werden.

Jedesmal, wenn ein leerer Wagen oben auf der schiefen Ebene ankommt, gelangt er auf einen Theil der Bahn, welcher horizontal ist. Nachdem er hier beladen und zu gleicher Zeit der andere unten an der schiefen Ebene entladen worden ist, darf man ihn nur ein wenig abwärts schieben, um ihn in Bewegung zu setzen, welche er dann von selbst fortsetzt. Man sieht in den Figuren 360 und 361 einen Fussboden D, welchen man um eine seiner Seiten drehen und auf diese Weise nach Belieben über das eine oder das andere der beiden Geleise legen kann. Dieser Fussboden hat den Zweck, das Beladen der Wägen zu erleichtern.

Eine schiefe Ebene, so eingerichtet, wie wir es eben beschrieben haben, nennt man eine selbstwirkende schiefe Ebene. Diejenige, welche hier abgebildet wurde, existirt in den Steinkohlenwerken in der Gegend von Saint-Étienne.

§. 240. **Drops.** — In England bedient man sich zum Einladen der Schiffe eigenthümlicher Maschinen, Drops genannt, welche ähnlich wie die selbstthätigen schiefen Ebenen wirken. Blos durch die Wirkung der Schwere werden die gefüllten Wägen, meist Kohlenwägen, in die zu beladenden Schiffe hinabgelassen und die entleerten alsdann wieder heraufgezogen. Die nähere Einrichtung der Maschine ist folgende:

Eine Eisenbahn, welche durch ein Gerüste (Fig. 362) getragen wird, setzt sich über den Rand des Ufers hinaus fort, wo das Einladen der Schiffe stattfindet. An dem oberen Ende eines Holzrahmens, der um seine unterste horizontale Seite wie um ein Scharnier beweglich ist, ist eine Art von Waagschale B aufgehängt. Wenn dieser bewegliche Rahmen so viel als möglich gehoben ist, so stellt sich die Schale B, welche er trägt, in die Verlängerung der Eisenbahn, sodass jeder Wagen sehr leicht von dieser letzteren auf die Schale übergehen kann. Wenn sich hierauf der Rahmen senkt, indem er sich um seine unterste horizontale Seite dreht, so gelangt dadurch die Schale auf das Verdeck des Schiffes, welches zu diesem Zweck an den passenden Platz gestellt wurde. Der oberste Theil des beweglichen Rahmens wird

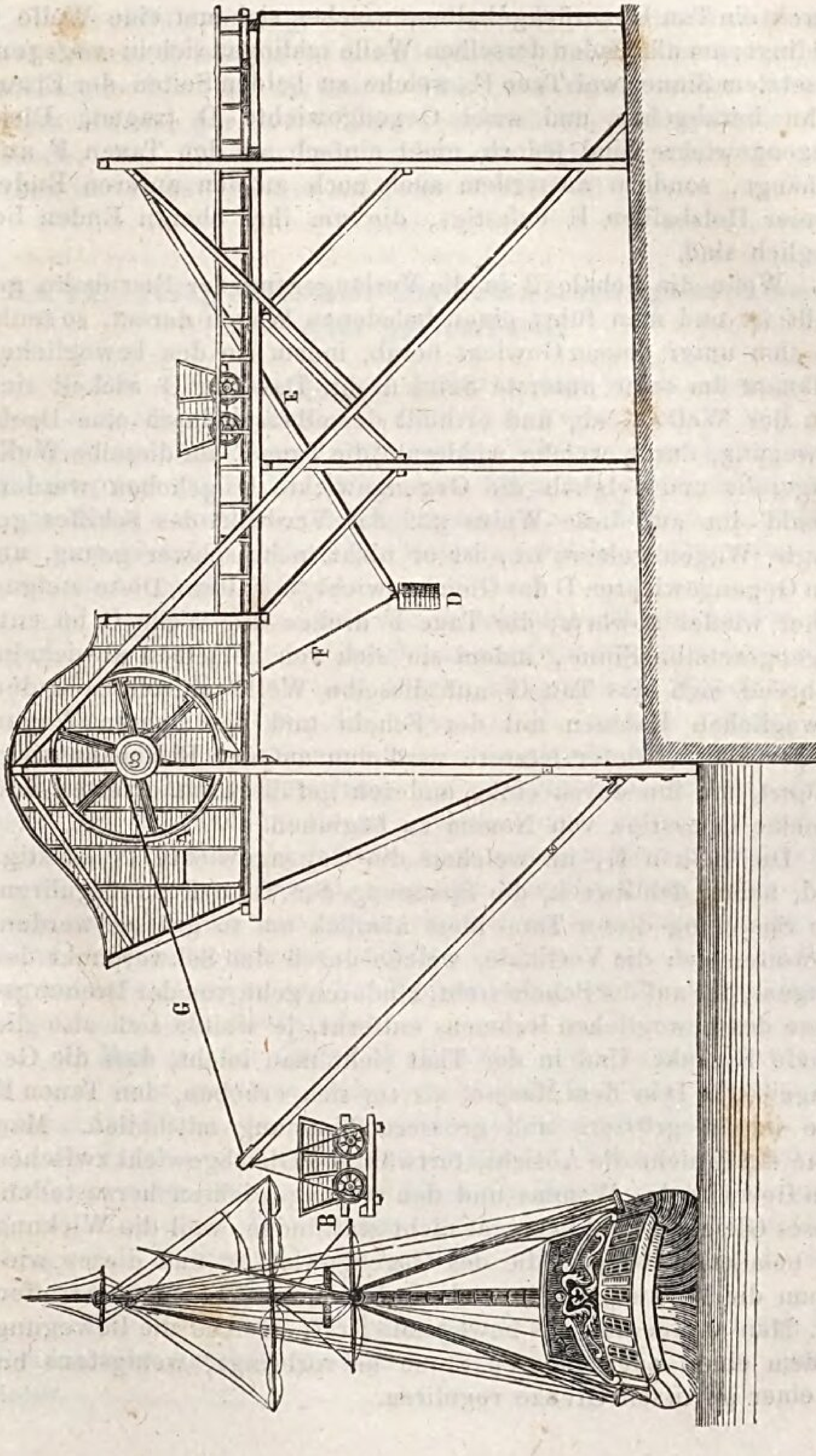


Fig. 362.

durch ein Tau G zurückgehalten, welches sich um eine Welle C schlingt; um die Enden derselben Welle schlingen sich in entgegengesetztem Sinne zwei Taue F, welche zu beiden Seiten der Eisenbahn herabgehen und zwei Gegengewichte D tragen. Diese Gegengewichte sind jedoch nicht einfach an den Tauen F aufgehängt, sondern ausserdem auch noch an den unteren Enden zweier Holzbalken E befestigt, die um ihre oberen Enden beweglich sind.

Wenn die Schale B in die Verlängerung der Eisenbahn gestellt ist und man führt einen beladenen Wagen darauf, so senkt sie sich unter dessen Gewicht herab, indem sie den beweglichen Rahmen um seine unterste Seite dreht. Das Tau G wickelt sich von der Welle C ab, und ertheilt derselben dadurch eine Drehbewegung, durch welche wiederum die Taue F auf dieselbe Welle aufgerollt und folglich die Gegengewichte D gehoben werden. Sobald der auf diese Weise auf das Verdeck des Schiffes gelangte Wagen geleert ist, ist er nicht mehr schwer genug, um den Gegengewichten D das Gleichgewicht zu halten. Diese steigen daher wieder abwärts; die Taue F drehen die Welle C im entgegengesetzten Sinne, indem sie sich von derselben abwickeln, während sich das Tau G auf dieselbe Welle aufrollt und den beweglichen Rahmen mit der Schale und dem leeren Wagen wieder hebt. Dieser letztere wird nun auf der Eisenbahn weggeführt, um ihn durch einen anderen gefüllten zu ersetzen und dieselbe Operation von Neuem zu beginnen.

Die Balken E, an welchen die Gegengewichte D befestigt sind, haben den Zweck, die Spannung der Taue F zu reguliren. Die Spannung dieser Taue muss nämlich um so grösser werden, je weiter sich die Vertikale, welche durch den Schwerpunkt des Wagens, der auf der Schale steht, hindurch geht, von der Drehungsachse des beweglichen Rahmens entfernt, je weiter sich also die Schale B senkt. Und in der That sieht man leicht, dass die Gegengewichte D in dem Maasse, als sie sich erheben, den Tauen F eine immer grössere und grössere Spannung mittheilen. Man hatte dabei nicht die Absicht, fortwährend Gleichgewicht zwischen dem Gewicht des Wagens und den Gegengewichten herzustellen. Dieses Gleichgewicht kann gar nicht stattfinden, weil die Wirkung des beladenen Wagens die des Gegengewichtes, und dieses wiederum die Wirkung des Gewichtes der leeren Wägen übertreffen soll. Man wollte nur die bewegende Kraft, welche die Bewegung in dem einen oder anderen Sinne hervorbringt, wenigstens bis zu einer gewissen Grenze reguliren.

Die Welle C trägt eine Trommel A, um welche eine ähnliche Bremse, wie sie in §. 181 (S. 374) beschrieben wurde, geschlungen ist. Der Arbeiter wirkt auf diese Bremse mittelst eines Hebels, der in der Figur punktirt ist, und verhindert dadurch, dass die Geschwindigkeit des Wagens weder im Auf- noch im Abwärtssteigen zu gross wird.

XII. Allgemeine Betrachtungen über die Motoren.

§. 241. Nach dem, was bisher gesagt wurde, wissen wir, dass sich eine Maschine nur dann in Bewegung setzen und eine Nutzarbeit leisten kann, wenn sie der Wirkung einer bewegenden Kraft unterworfen ist. Alles was fähig ist, eine solche Kraft auszuüben, nennt man im Allgemeinen einen Motor. Wir wollen die verschiedenen Arten von Motoren, welche angewendet werden, nacheinander angeben.

1) Der Mensch sowohl, wie verschiedene Thiere werden sehr häufig zur Bewegung von Maschinen angewendet: man bezeichnet sie in diesem Fall mit dem Namen thierische Motoren.

2) Federn, wie diejenigen z. B., welche verschiedene Arten von Uhren in Gang setzen, sind gleichfalls Motoren. Zwar kann eine Feder nur so lange auf eine Maschine wirken, als sie gespannt ist, und um sie zu spannen, muss zuvor ein anderer Motor auf sie gewirkt haben. Aber von dem Moment an wenigstens, wo sie gespannt ist, mag nun ihre Spannung durch diese oder jene Ursache hervorgebracht worden sein, muss sie als ein Motor betrachtet werden, welcher im Stande ist, eine Maschine zu bewegen, indem er die Widerstände, welche an derselben angebracht sind, überwindet.

3) Man wendet ferner als Motoren schwere Körper an, die von einer gewissen Höhe herabfallen. Beispiele davon sahen wir bei den Uhren, an den selbstwirkenden schiefen Ebenen u. s. w.

4) Fliessendes Wasser in Bächen, Flüssen und Strömen wirkt in einer Menge von Fällen als Motor: indem es durch Vermittlung eines Wasserrades wirkt, treibt es eine unzählige Menge von Mühlen, Hammerwerken, Spinnereien, Sägewerken und überhaupt Fabriken aller Art.

5) Die Bewegung der Luft oder der Wind wird durch die Windmühlen nutzbar gemacht und auf diese Weise zu einem Motor.

6) Die Spannung, welche die **Wärme** dem Wasserdampfe und überhaupt den Dämpfen leichter verflüchtigbarer Flüssigkeiten, sowie auch den Gasen mittheilt, liefert einen ausserordentlich werthvollen Motor, dessen Anwendung sich mehr und mehr ausbreitet.

7) Ein stark comprimirtes Gas kann, indem es auf dieselbe Art wie eine Feder wirkt, eine Maschine ebenfalls in Bewegung setzen; diese Art von Motor wird jedoch nur selten angewendet.

8) Endlich muss unter die Zahl der Motoren auch noch die Elektricität gestellt werden; dieselbe wird in den sog. elektromagnetischen Maschinen nutzbar gemacht. Ihre Anwendung unter diesem Gesichtspunkt ist bis jetzt jedoch noch sehr beschränkt.

§. 242. Die verschiedenen Motoren, welche wir soeben aufgezählt haben, sind nicht alle gleich wichtig. Vom Standpunkte der Industrie aus kann man sagen, dass es in Wirklichkeit eigentlich nur vier Motoren gibt: 1) die thierischen Motoren, 2) die fliessenden Gewässer, 3) den Wind, 4) den Dampf.

Diese Motoren können im Allgemeinen ihre Wirkung nur durch Vermittlung einer besonderen Maschine ausüben, welche keinen anderen Zweck hat, als ihnen zu gestatten, ihre Kraft zu entwickeln und auf den Mechanismus zu übertragen, an welchen die zu überwindenden Widerstände angebracht sind. Die Maschinen dieser Art werden mit dem Namen **Kraftmaschinen** bezeichnet: solche sind z. B. die Wasserräder, die Dampfmaschinen u. s. w.

Die Betrachtung eines Motors in Bezug auf seine Leistungsfähigkeit kann unter zwei verschiedenen Gesichtspunkten geschehen. Man kann zunächst den Motor selbst für sich allein betrachten, ohne sich mit den Mitteln zu beschäftigen, durch welche seine Wirkung nutzbar gemacht wird; auf diese Weise erhält man eine Bestimmung der gesammten Quantität von Arbeit, welche er in einer gegebenen Zeit zu leisten vermag und welche niemals überschritten werden kann, welches auch die Einrichtung der Maschine ist, an welcher er angebracht wird. Diese Arbeit, die gewöhnlich in Pferdekräften ausgedrückt wird (§. 34), heisst die **theoretische Leistungsfähigkeit**, auch der **Totaleffekt** des Motors. Sie ist für die Kraftmaschine, an welcher der Motor wirkt, nicht ganz das, was wir in §. 175 unter der Bewegungsarbeit einer Maschine verstanden haben, obwohl sie häufig dafür genommen wird. Die eigentliche Bewegungsarbeit ist um die Verluste kleiner, welche allemal bei der Wirkung des Motors auf seine Kraftmaschine vorkommen. Diese Verluste wer-

den z. B. durch das neben den Schaufeln unbenützt abfliessende Wasser bei den Wasserrädern, durch die Abkühlung des Dampfes bei den Dampfmaschinen u. s. f. hervorgerufen.

Man kann zweitens den Motor auch in Verbindung mit seiner Kraftmaschine betrachten und muss dies allemal thun, wenn man sich von der Grösse der Arbeit Rechenschaft geben will, über welche man bei der Anwendung jener Maschine wirklich verfügen kann. Diese Arbeit, die gewöhnlich ebenfalls in Pferdekräften ausgedrückt wird, heisst die Nutzarbeit oder auch die Nutzleistung der angewandten Maschine; und nach dem, was wir oben und im §. 175 gesagt haben, ist leicht einzusehen, dass der Nutzeffekt einer Kraftmaschine gleich ist dem Totaleffekt des Motors, welcher an ihr wirkt, vermindert um die stattfindenden Verluste an Arbeit und weiter noch vermindert um die Widerstandsarbeit, welche die Kraftmaschine selbst zu ihrer Bewegung in Anspruch nimmt. Wenn man den Nutzeffekt, den eine Kraftmaschine gibt, mit dem Totaleffekt des an ihr wirksamen Motors vergleicht, so erhält man dadurch einen Anhaltspunkt für den Grad der Vollkommenheit der Maschine. Man nennt, ähnlich wie in §. 177, das Verhältniss aus der Nutzleistung einer Kraftmaschine in den Totaleffekt des an ihr wirkenden Motors ihren Wirkungsgrad oder Nutzeffekt. Der Werth dieses Verhältnisses kann niemals gleich Eins werden; aber je mehr er sich der Einheit nähert, desto grösser ist die Vollkommenheit der angewandten Kraftmaschine.

Die Betrachtung eines Motors an und für sich in Bezug auf seine Leistungsfähigkeit geschieht, indem man untersucht, welche Kraft er in jedem Augenblick entwickeln kann, und welchen Weg der Angriffspunkt dieser Kraft, in der Richtung der letzteren gemessen, in einer bestimmten Zeit zurücklegt. Man wird auf diese Weise bei manchen Motoren zu ganz bestimmten, bei anderen dagegen zu Resultaten gelangen, die von verschiedenen Umständen abhängen. Bei einem fliessenden Wasser z. B. führt die Kenntniss des Gefälls und die Menge des Wassers, welche in einer bestimmten Zeit geliefert wird, zu dem Maasse der Leistungsfähigkeit oder des Totaleffekts dieser Wasserkraft, welche dadurch vollkommen bestimmt wird. Wenn es sich dagegen um einen thierischen Motor handelt, einen Menschen z. B., so erkennt man leicht, dass die Kraft desselben unter verschiedenen Umständen eine sehr verschiedene ist. So werden wir bald sehen, dass die Grösse dieser Kraft davon abhängt, ob der Mensch mit seinen Händen oder mit seinen Füssen thätig ist, ob er zieht

oder schiebt, ob er seine Kraft in horizontaler oder in vertikaler Richtung ausübt u. s. f. Um in allen diesen Fällen zu einem Resultat betreffs der Leistung an Arbeit zu gelangen, darf man nur die Mittel anwenden, welche wir bereits kennen (s. §§. 23 u. 26—37). In dem folgenden Paragraphen wollen wir noch ein sehr häufig angewandtes und bequemes Mittel kennen lernen, die Nutzleistung einer Kraftmaschine zu messen.

§. 243. **Das Bremsdynamometer.** — In den meisten Fällen setzt die Kraftmaschine eine Welle in Bewegung und die Rotationsbewegung dieser Welle ist es dann, welche zur Leistung von Arbeiten aller Art gebraucht wird. So erhält ein Wasserrad direkt durch die Wirkung des Wassers eine drehende Bewegung, an welcher die Welle, von welcher es getragen wird, Theil nimmt; diese Welle treibt alsdann die Mühle, das Sägewerk, das Hammerwerk etc. Ebenso ertheilt die Dampfmaschine in einer Fabrik zunächst einer horizontalen Welle eine Rotationsbewegung, und diese Welle ist es, von der die Bewegung genommen und auf die Arbeitsmaschinen übertragen wird. Wenn man die Nutzleistung der Kraftmaschine messen will, so hebt man die Verbindung der Welle, welche durch sie in Bewegung gesetzt wird, mit den Arbeitsmaschinen und überhaupt mit den zu überwindenden Widerständen auf und bringt anstatt dessen an dieser Welle einen künstlich erzeugten Widerstand an, dessen Grösse leicht bestimmt werden kann. Indem man diesen Widerstand in richtiger Weise abändert, kann man es leicht dahin bringen, dass die Maschine dieselbe Bewegung annimmt, wie diejenige, welche sie gewöhnlich besitzt, und dass sie sich folglich der Einwirkung des Motors gegenüber ganz so verhält, wie dies bei ihrem gewöhnlichen Gebrauch der Fall ist. Es reicht dann hin, die Grösse der von der Maschine behufs Ueberwindung dieses Widerstands geleisteten Arbeit zu messen, um den Nutzeffekt, welchen sie unter den gewöhnlichen Umständen ihrer Thätigkeit leistet, zu erhalten.

Um den eben besprochenen künstlichen Widerstand hervorzubringen, bedient man sich des Bremsdynamometers oder, wie es nach seinem Erfinder auch genannt wird, des *Prony'*schen Zaums. Dieser Apparat ist in Fig. 363 dargestellt. A ist die horizontale Triebwelle, an welcher die Bremse angebracht wird. Die Oberfläche dieser Welle muss an der in Gebrauch kommenden Stelle genau cylindrisch sein; wenn es nicht der Fall ist, so bringt man eine eiserne Muff auf derselben an, welche man mit Keilen so befestigt, dass alle Punkte ihrer

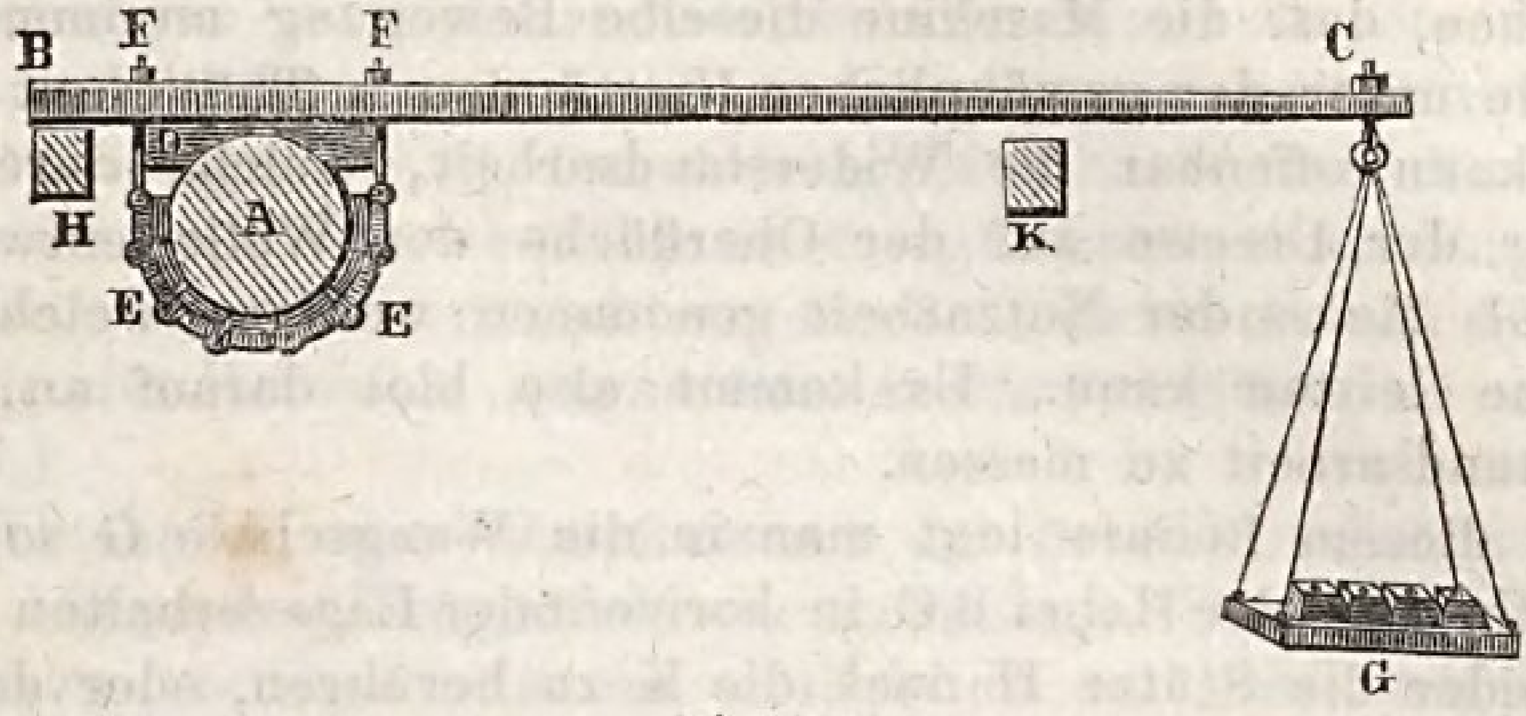


Fig. 363.

Oberfläche gleichweit von der Rotationsachse entfernt sind, oder dass sie, wie man sagt, gut centrirt ist. Ein hölzerner Hebel BC ist mit einem Stück D, gleichfalls von Holz, versehen, dessen untere Seite so ausgeschnitten ist, dass es einen Theil der Oberfläche der Welle oder der Muff, wenn eine solche vorhanden ist, umfasst. Eine Kette EE, welche aus Blechplatten gebildet wird, die in Scharnieren an einander befestigt sind, ist gleichfalls mit kleinen Holzstücken belegt, welche sich rings um den übrigen Theil der Oberfläche der Welle A anlegen; diese Kette endigt sich in zwei Schraubenbolzen, welche durch den Hebel BC hindurchgehen und an deren Enden zwei Muttern F, F angeschraubt sind. An dem Ende C des Hebels BC ist eine Waagschale aufgehängt, welche dazu bestimmt ist, Gewichte aufzunehmen. Die Stützen H, K sind so angebracht, dass sich der Hebel weder nach der einen noch nach der anderen Richtung zu weit von der horizontalen Lage entfernen kann, in der er erhalten werden muss.

Setzen wir voraus, dass die Welle A durch die Kraftmaschine, deren Nutzleistung man bestimmen will, in Bewegung gesetzt werde, und dass man die Schrauben F, F so stark angezogen habe, dass mittelst des Holzstücks D, sowie derjenigen Holzstücke, mit denen die Kette EE belegt ist, ein bestimmter Druck gegen die Oberfläche der Welle ausgeübt wird. Die Adhäsion, welche sich dadurch zwischen der Welle und jenen Backenstücken der Bremse entwickelt, sucht den Hebel BC in die Rotationsbewegung der Welle mit fortzureissen, aber dem widersetzt sich die Stütze H; indem dieselbe den Hebel zwingt, unbeweglich zu bleiben, veranlasst sie das Gleiten der Welle zwischen den Backen der Bremse. Die Reibung, welche aus diesem Gleiten erfolgt, ist ein Widerstand, der, indem er an der Welle A wirkt, die Bewegung derselben zu verzögern sucht. Es ist klar, dass man es durch Probiren leicht dahin bringen kann, die Schrauben F, F so stark

anzuziehen, dass die Maschine dieselbe Bewegung annimmt, als wenn sie unter den gewöhnlichen Umständen in Thätigkeit wäre. Dabei kann offenbar die Widerstandsarbeit, welche durch die Reibung der Bremse auf der Oberfläche der Welle entwickelt wird, als Maass der Nutzarbeit genommen werden, welche die Maschine leisten kann. Es kommt also blos darauf an, jene Widerstandsarbeit zu messen.

Zu diesem Behufe legt man in die Waagschale G so viele Gewichte, dass der Hebel BC in horizontaler Lage erhalten wird, ohne weder die Stütze H noch die K zu berühren, oder dass er wenigstens zwischen diesen beiden fortwährend oscillirt. Alsdann befindet sich der Hebel BC unter der Wirkung der aufgelegten Gewichte und der Reibung, welche sich in den Berührungspunkten der Welle mit den Backen der Bremse entwickelt, im Gleichgewicht. Nehmen wir der Einfachheit halber zunächst an, dass das Gewicht der Bremse selbst mit Einschluss der Waagschale G vernachlässigt werden darf, und denken wir uns die Reibung, welche in den verschiedenen Berührungspunkten der Welle mit den Backen der Bremse entwickelt wird, als eine einzige Kraft, die an dem Umfang der Welle tangentiell an derselben wirkt, so folgt aus dem Gleichgewicht des Hebels BC, dass sich die in der Waagschale liegenden Gewichte zur Reibung umgekehrt wie die Hebelarme dieser beiden Kräfte verhalten müssen. Nun ist der Hebelarm der Reibung der Halbmesser der Welle A und der Hebelarm der in der Waagschale liegenden Gewichte die Entfernung der durch den Aufhängpunkt C dieser Waagschale gehenden Vertikalen von der Umdrehungsachse der Welle, und da sich diese beiden Längen genau so, wie die Umfänge der mit ihnen beschriebenen Kreise verhalten, so kann man auch sagen: Die in der Waagschale G liegenden Gewichte müssen sich zur Reibung wie der Umfang der Welle A zum Umfang des Kreises verhalten, der mit der Entfernung der durch C gehenden Vertikalen von der Umdrehungsachse der Welle beschrieben wird, oder was auf dasselbe hinauskommt: Die Reibung, multiplicirt mit dem Umfang der Welle A, muss gleich sein den in G liegenden Gewichten, multiplicirt mit dem Umfang des Kreises, dessen Radius soeben angegeben wurde. Ersteres Produkt ist aber nichts anderes als die Arbeit, welche durch die Reibung während einer Umdrehung der Welle A entwickelt wird. Diese Arbeit kann folglich auch durch das zweite Produkt, dessen Faktoren leicht gemessen werden können, bestimmt werden. Wenn man dann dieses Produkt mit der Anzahl der

Umdrehungen multiplicirt, welche die Welle in der Secunde macht, so erhält man die Arbeitsmenge, welche die Maschine in jenem Zeitraum leistet, und vorausgesetzt, dass man die Längen in Metern und die Gewichte in Kilogrammen ausgedrückt hat, darf man die erhaltene Zahl nur durch 75 dividiren, um die Nutzleistung der Maschine, ausgedrückt in Pferdekräften, zu erhalten. (§. 34.)

Wir haben oben das Gewicht der Bremse selbst und der daran hängenden Waagschale vernachlässigt. Um es in Betracht zu ziehen, verfährt man am einfachsten so, dass man mittelst einer gewöhnlichen Federwaage die Kraft misst, welche in dem Punkt C vertikal von unten nach oben angebracht werden muss, um die Bremse horizontal zu halten, wenn die Schrauben F, F nicht angezogen sind und die Waagschale G kein Gewicht enthält. Diese Kraft fügt man den in der Waagschale liegenden Gewichten bei, bevor man die oben angezeigte Rechnung ausführt. Wenn aber eine solche Federwaage nicht zu Gebot steht, so fügt man das Gewicht der Waagschale einfach den in ihr liegenden Gewichten bei, während man das des Hebels in seinem Schwerpunkt wirkend denkt und mittelst des Momentensatzes auf das Ende des Hebels reducirt.

Fassen wir nun nochmals kurz zusammen, was man zu thun hat, um die Nutzleistung einer Kraftmaschine mittelst des Bremsdynamometers zu bestimmen. Nachdem man dasselbe um die Triebwelle gelegt hat, zieht man die Schrauben F, F so stark an, dass die Maschine die gewöhnliche Geschwindigkeit annimmt. Hierauf balancirt man den Hebel der Bremse durch Gewichte, welche man in die Waagschale G einlegt. Diese Gewichte, in Kilogrammen ausgedrückt und vermehrt um diejenigen, welche nöthig sind, um das Gewicht der Bremse selbst und der Waagschale zu berücksichtigen, werden mit dem in Metern ausgedrückten Umfang des Kreises multiplicirt, welcher zum Halbmesser die Entfernung der durch den Aufhängepunkt C der Waagschale gehenden Vertikalen von der Umdrehungsachse der Welle hat. Das erhaltene Produkt mit der Anzahl der Umdrehungen der Welle A in der Secunde multiplicirt und durch 75 dividirt, gibt die Nutzleistung der Kraftmaschine, ausgedrückt in Pferdekräften.

B e i s p i e l: Bei der Bestimmung des Nutzeffekts eines Wasserrades seien die Gewichte, welche in die Waagschale des Bremsdynamometers, welches an der Welle desselben angebracht wurde, gelegt werden mussten, 250 Kilogramm. Die in Folge des Ge-

wichts des Dynamometers und der Waagschale hinzuzufügenden Gewichte betragen 15 Kilogramm, und die Entfernung der Vertikalen durch den Aufhängepunkt der Waagschale von der Umdrehungsachse der Welle sei 3 Meter. Unter diesen Umständen habe das Wasserrad 6 Umdrehungen in der Minute gemacht. — Der Umfang des Kreises, dessen Halbmesser 3^m ist, misst bekanntlich $18{,}84^m$; diese Zahl, mit den um 15^k vermehrten 250^k, also mit 265^k und hierauf noch mit der Zahl der Umdrehungen in der Secunde, $^1/_{10}$, multiplicirt, gibt $499,^{km}26$ als Arbeitsleistung der Maschine in einer Secunde. Mit 75 dividirt, erhält man 6,65 Pferdekräfte als Nutzleistung des Wasserrades.

Es bezeichne allgemein P die in die Waagschale gelegten Gewichte, w das Gewicht der Schale selbst und p das Gewicht des Hebels; ferner L die Länge des Hebels von der Mitte der Triebwellen bis zum Aufhängepunkt der Waagschale und l die Entfernung des Schwerpunkts des Bremshebels von jener Mitte, so ist das Gewicht des Hebels, reducirt auf sein Ende, $p \frac{l}{L}$ und daher die Arbeit, geleistet bei einer Umdrehung

$$2\left(P + w + p \frac{l}{L}\right) L \pi.$$

Für n Umdrehungen in der Minute ist daher die Leistung in Pferdekräften:

$$\frac{2 n \left(P + w + p \frac{l}{L}\right) L \pi}{60 \times 75} = \frac{n \pi}{2250}\Big[(P + w) L + pl\Big].$$

§. 244. **Thierische Motoren.** — Wir sind gegenwärtig noch nicht in den Stand gesetzt, die Wirkungsweise aller der verschiedenen Motoren, von denen wir oben gesprochen haben, näher angeben zu können und müssen uns für jetzt damit begnügen, die thierischen Motoren näher zu betrachten. In dem Maasse, als sich in der Folge Gelegenheit dazu geben wird, werden wir auch bezüglich der übrigen das nachholen, was wir für jetzt übergehen müssen.

Die Kraft des Menschen kann auf verschiedene Art angewandt werden. Er kann in horizontaler oder vertikaler Richtung einen Druck oder Zug ausüben, indem er blos mit seinen Händen wirkt, ohne seinen Ort zu verändern; oder er kann sitzend mit seinen Füssen einen Druck hervorbringen; oder er kann sich auch fortbewegen und dabei drückend oder ziehend thätig sein; endlich kann er auch noch durch sein Gewicht allein wirken, wie wir das schon bei dem Sprossenrad (§. 83) gesehen haben. Die Arbeit, welche er unter diesen verschiedenen Umständen leistet, ist sehr verschieden. Es ist folglich wichtig zu wissen, auf welche Art

seine Kraft angewandt werden muss, damit er die grösstmögliche Menge von Arbeit leisten kann. Aber indem man sich mit dieser Frage beschäftigt, darf man nicht vergessen, dass der Mensch während der Arbeit ermüdet; wenn man ihn während einer gegebenen Zeit eine zu grosse Menge von Arbeit leisten lassen will, so wird er den Tag über nicht so lange arbeiten können; und wenn man an einem Tag zu viel von ihm fordert, so wird daraus eine Müdigkeit folgen, die bis in den nächsten Tag andauern wird, und dies muss allemal vermieden werden.

Was zunächst die Grösse der Kraft betrifft, welche ein Mensch aufbieten kann, um einen bestimmten Widerstand zu überwinden, so ist dieselbe, je nach der Art und Weise, in welcher er wirkt, sehr verschieden. Man hat gefunden, dass er die grösste Kraft in dem Fall entwickeln kann, wo er ein Gewicht zu heben sucht, das zwischen seinen Beinen steht. Diese Maximalkraft kann 200, bei manchen Individuen selbst 300 Kilogramm betragen; im Mittel kann man sie zu 130 Kilogramm annehmen.

Aber die von dem Menschen aufgewendete Kraft ist nur ein Element der Arbeit, welche er leistet. Um zu einem richtigen Begriff von der Grösse dieser Arbeit zu gelangen, ist es nöthig, auch den Weg in Rechnung zu ziehen, welchen er den Angriffspunkt der Kraft, welche er ausübt, durchlaufen lassen kann. Wenn ein sehr grosser Widerstand zu überwinden ist, so wird sich der Arbeiter in sehr kurzer Zeit bedeutend ermüden und den Angriffspunkt dieses Widerstands nur eine sehr kurze Strecke mit fortbewegen können; bei sehr geringem Widerstand dagegen kann er den Angriffspunkt desselben einen viel grösseren Weg zurücklegen machen. In dem ersten dieser beiden Fälle sowohl wie in dem zweiten, wird eines der Elemente der Arbeit, welche täglich geleistet wird, sehr klein, und folglich wird diese tägliche Arbeit selbst nur eine kleine Grösse haben. Wenn dagegen der zu überwindende Widerstand eine mittlere Grösse hat, so wird er, während der Arbeiter seinen Angriffspunkt mit mittlerer Geschwindigkeit fortbewegen kann, innerhalb eines Tages immer noch einen bedeutenden Weg zurücklegen können, und es wird daraus eine grössere Menge von Arbeit folgen als in den beiden vorhergehenden Fällen. Es soll daher ein Mensch, wenn er auf die Dauer arbeiten soll, in jedem Augenblick nur einen Theil der Maximalkraft aufbieten, welche er möglicherweise entwickeln kann.

Es ist Sache der Erfahrung, die Grösse der Kraft, welche ein Mensch ausüben, und die Geschwindigkeit, mit welcher er

deren Angriffspunkt fortbewegen kann, unter der Bedingung auszumitteln, dass die geleistete Arbeit bei den verschiedenen Umständen, unter welchen die Kraft wirkt, die grösstmögliche wird. So hat man gefunden, dass von den Menschen, welche an einer Zugramme arbeiten, jeder ungefähr 20 Kilogramm von dem Gewicht des Rammbären einen Meter hoch heben soll; dass ferner die Arbeiter ungefähr 20 Schläge in der Minute und in dieser Geschwindigkeit 60 bis 80 Schläge nacheinander machen, hierauf aber so lange ruhen sollen, als sie vorher gearbeitet haben. Jeder der Menschen, welche an einer Erdwinde arbeiten, soll am Ende des Hebels, an welchem er wirkt, eine Kraft von 20 Kilogramm ausüben und seinen Angriffspunkt mit einer Geschwindigkeit von 0,6 Meter fortbewegen. Ein Arbeiter, welcher an einer Kurbel dreht, deren Radius ungefähr $0^{m},32$ beträgt, soll auf den Handgriff derselben einen Druck von 7 bis 8 Kilogramm ausüben und die Kurbel 20 bis 25 mal in der Minute herumdrehen. Um dieses letztere Resultat auszumitteln, wandte man eben die dynamometrische Kurbel an, die wir bereits oben (§. 23) kennen gelernt haben.

Im Allgemeinen kann man sagen, dass die Arbeit, welche ein Mensch täglich leisten kann, grösser ist, wenn er von Zeit zu Zeit ruht, als wenn er fortwährend in Thätigkeit ist. Andererseits ist diese Arbeit um so grösser, je mehr sich die durch seine Muskeln ausgeübte Kraft derjenigen nähert, welche denselben von Natur zukommt. Nehmen wir z. B. einen Menschen, welcher seine Tagesarbeit dazu verwendet, eine Rampe oder Stiege, ohne irgend eine Last zu tragen, abwechselnd hinauf- und wieder herabzusteigen. Die blose Hebung seines Körpers, während er emporsteigt, nimmt eine gewisse Menge Arbeit in Anspruch, welche man berechnen kann, indem man das Gewicht seines Körpers mit der ganzen Höhe multiplicirt, um die er sich in der Richtung der Vertikalen erhebt; diese Arbeit wird man immer grösser finden als diejenige, welche er an demselben Tag geleistet haben würde, wenn er mit einer Last empor- und leer niedergestiegen wäre, die Erhebung seines Körpers bei der Berechnung des letzteren Resultats natürlich mit inbegriffen. In der That sieht man, dass, wenn ein Mensch mit einer Last emporsteigt, die Muskeln seiner Beine, welche blos dazu bestimmt sind, seinen Körper allein zu tragen, mehr angestrengt werden, als sie es gewöhnlich sein sollen, und es folgt daraus eine Ermüdung, welche eine bedeutende Verminderung der durch diese Muskeln geleisteten Arbeit nach sich zieht.

Bei dem abwechselnden Auf- und Absteigen einer Rampe oder Stiege leistet ein Mensch, welcher unbelastet ist, indem er auf diese Weise täglich 8 Stunden arbeitet, den Tag über eine Arbeit von 280000 km. Derselbe Mensch, auf eine Kurbel wirkend, leistet in derselben Zeit nur 172000 km, und wenn er dazu verwendet würde, den Rammbären einer Zugramme zu heben, so würde er sogar nicht viel mehr als 100000 km zu leisten im Stande sein. Es ist also sehr vortheilhaft, die Arbeit eines Menschen allemal in der einfachen Erhebung seines Körpers bestehen zu lassen, vorausgesetzt, dass diese Erhebung dazu angewandt werden kann, die zu erzielende Wirkung zu erhalten. Dies will man erreichen, indem man sich des in Fig. 364 abgebildeten Apparats bedient, um Erde oder Sand in die Höhe zu fördern. Dieser Apparat besteht aus einer grossen Rolle, um welche ein Seil geschlungen ist, das an beiden Enden eine grosse Schale, ähnlich einer Waagschale, trägt. Die Länge dieses Seiles ist

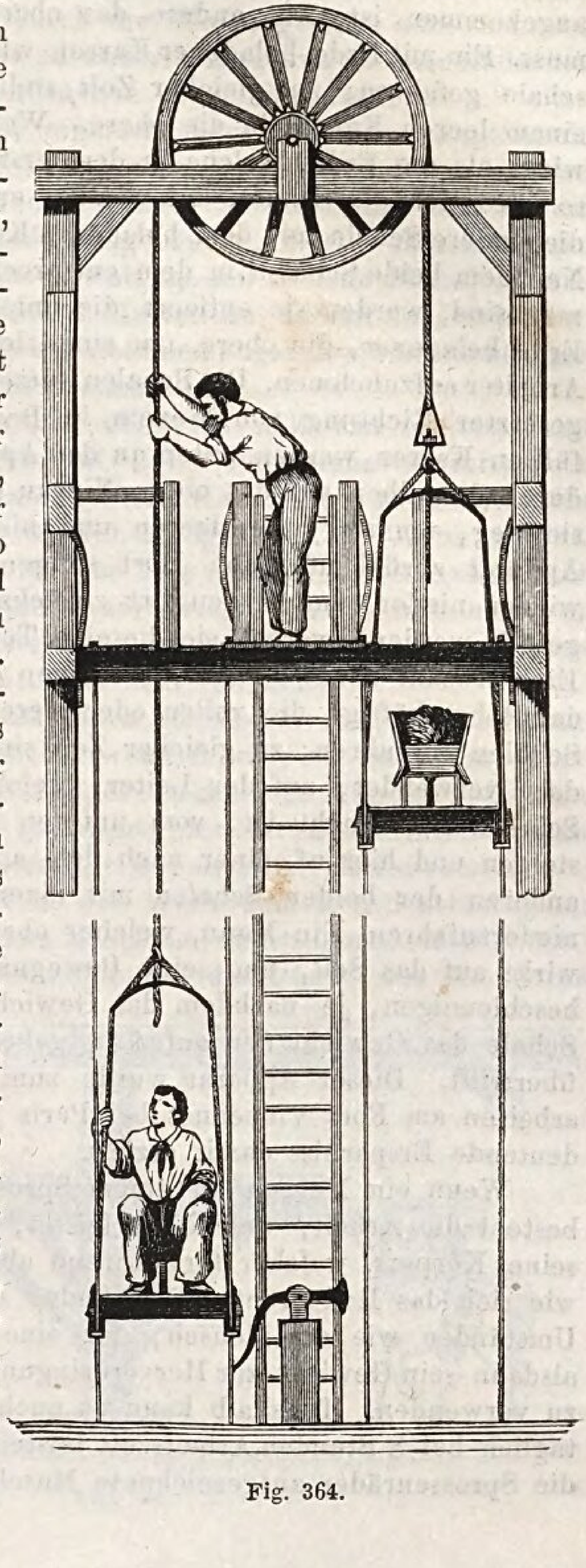


Fig. 364.

dadurch bestimmt, dass, wenn die eine Schale im unteren Niveau angekommen ist, die andere das obere gerade erreicht haben muss. Ein mit Erde beladener Karren wird auf die untere Waagschale gefahren; zu gleicher Zeit stellt sich ein Arbeiter mit einem leeren Karren in die obere. Wenn dieser Arbeiter mehr wiegt als die Erde, welche in dem ersten Karren enthalten ist, so wird sich die Schale, auf welcher er steht, senken, während die andere Schale mit dem beladenen Karren in die Höhe steigt. Nachdem beide Schalen in dem entsprechenden Niveau angekommen sind, werden sie entleert, die untere, um wieder einen mit Erde beladenen, die obere, um einen leeren Karren nebst einem Arbeiter aufzunehmen. Die Schalen setzen sich nun in entgegengesetzter Richtung von Neuem in Bewegung u. s. f. Die gefüllten Karren werden unten an den Apparat geführt; sobald sie durch denselben auf das obere Niveau gehoben sind, fährt man sie weg, um sie zu entleeren und hierauf leer wieder an den Apparat zurückzuführen. Dort steigen sie mit einem Arbeiter wieder nieder, um an den Ort zurückzukehren, wo sie wieder gefüllt werden, worauf sie dieselbe Tour von Neuem beginnen. Eine Anzahl Arbeiter sind, die einen oben, die andern unten, damit beschäftigt, die vollen oder leeren Karren von und zu den Schalen zu fahren; zu gleicher Zeit sind andere Arbeiter einzig dazu verwendet, auf der Leiter, welche zwischen den beiden Schalen angebracht ist, vom unteren Niveau auf das obere zu steigen und hierauf, einer nach dem anderen, auf der einen oder anderen der beiden Schalen mit einem leeren Karren wieder niederzufahren. Ein Mann, welcher oben an dem Apparat steht, wirkt auf das Seil, um seine Bewegung zu verzögern oder zu beschleunigen, je nachdem das Gewicht der abwärts gehenden Schale das Gewicht der aufwärts gehenden mehr oder weniger übertrifft. Dieser Apparat wurde zum erstenmal bei den Erdarbeiten am Fort Vincennes bei Paris angewandt und eine bedeutende Ersparniss damit erzielt.

Wenn ein Mensch an einem Sprossenrad wirkt (§. 83), so besteht die Arbeit, welche er leistet, lediglich in der Hebung seines Körpers, welcher fortwährend abwärts zu fallen sucht, sowie sich das Rad dreht; er befindet sich also unter ähnlichen Umständen wie ein Mensch, der eine Leiter hinaufsteigt, um alsdann sein Gewicht zur Hervorbringung eines nützlichen Effekts zu verwenden. Desshalb kann er auch bis zu 256 000^{km} Arbeit täglich bei 8 Stunden Arbeitszeit leisten. Man sieht daraus, dass die Sprossenräder ausgezeichnete Maschinen sind, um die Kraft

des Menschen nutzbar zu machen. Natürlich kann die Rotationsbewegung, welche sie durch die Wirkung eines oder mehrerer Menschen erhalten, auch zu anderen Zwecken als zum Aufziehen der Steine aus den Steinbrüchen verwendet werden.

§. 245. Das Pferd wird sehr häufig als Motor angewandt, bietet aber viel weniger Verschiedenheiten in der Art und Weise, auf welche seine Kraft angebracht werden kann, dar als der Mensch. Die Art seiner Wirkung beschränkt sich fast allein auf das Ziehen in horizontaler Richtung und in dem Sinne, in welchem es sich bewegt. Ueber die Grösse der Arbeit, welche es leisten kann, gelten zunächst dieselben allgemeinen Betrachtungen wie bei der Arbeit des Menschen.

Die Maximalkraft, welche ein Pferd im Ziehen ausüben kann, erhebt sich im Mittel bis auf 400^k; aber wenn es fortgesetzt arbeiten soll, so darf man ihm nur viel weniger zumuthen. Ein gutes Fuhrmannspferd, welches 6 Tage in der Woche arbeitet und ungefähr 28 Kilometer per Tag mit einer Geschwindigkeit von 3 Kilometer per Stunde zurücklegt, kann nicht mehr als eine Zugkraft von 50^k ausüben; die Arbeit, welche es auf diese Weise in einem Tag leistet, ist also 1400000^{km}.

Wenn man die Kraft eines Pferdes in anderer Weise als zum Ziehen eines Wagens verwenden will, so lässt man es gewöhnlich an einem Pferdegöpel wirken. In diesem Falle wird es an einen Holzbalken gespannt, der in radialer Richtung an einer vertikalen Welle befestigt ist; es zieht, indem es im Kreise herumgeht, und ertheilt so der Welle eine Rotationsbewegung, welche sich auf jede Art von Maschinen übertragen lässt (Fig. 365). Man kann sagen, dass der Göpel für das Pferd, was die Kurbe

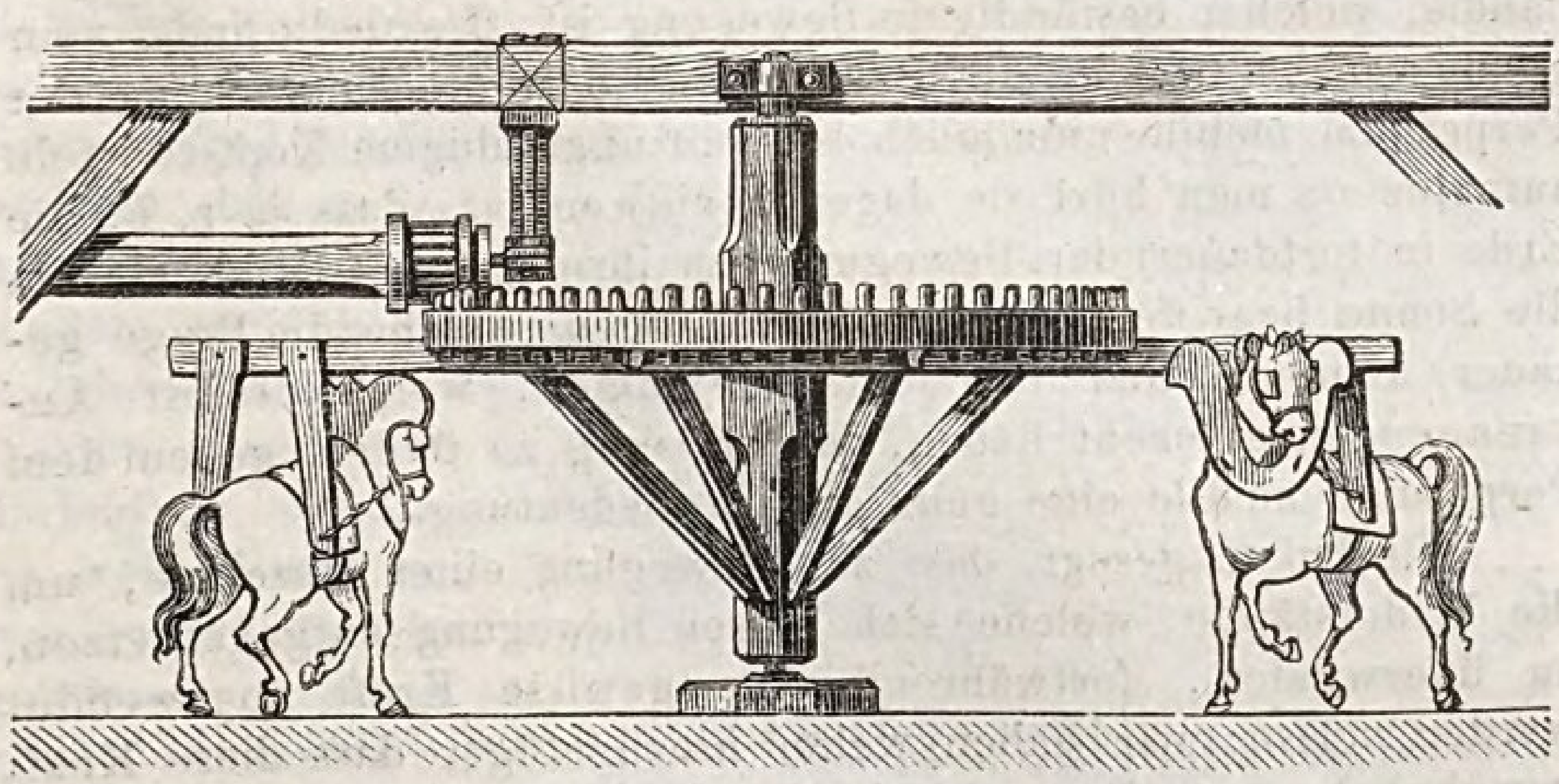


Fig. 365.

für den Menschen ist. Ein Pferd, welches an einem Göpel arbeitet, leistet weniger als oben angegeben; es ermüdet früher. Damit die Bewegung im Kreise nicht zu grossen Einfluss übt, muss der Göpel wenigstens 13^m im Durchmesser haben. Wenn man die Menge der Arbeit, welche ein Pferd an einem Göpel leistet, mit derjenigen eines Menschen vergleicht, der an einer Kurbel arbeitet, so findet man, dass die Leistung eines Pferdes ungefähr der von 7 Menschen gleich ist.

Die Arbeit, welche von einem Pferde an einem Göpel geleistet wird, überschreitet nicht 42^{km} in der Secunde. Man sieht also, dass wir Grund hatten, oben (§. 34) zu sagen, dass sie geringer als diejenige Leistung ist, welche man eine Pferdekraft nennt und für welche 75^{km} in der Secunde festgesetzt ist.

Ein Ochse, an einen Wagen gespannt, kann eine Zugkraft ausüben, welche beinahe der des Pferdes gleich ist. Aber in Folge seiner natürlichen Langsamkeit leistet er fast nur die Hälfte der Arbeit des Pferdes. An einem Göpel dagegen leistet er fast dieselbe Arbeit wie dieses.

Ein an einen Göpel gespannter Esel leistet nicht viel mehr als den vierten Theil der Arbeit eines Pferdes.

§. 246. **Perpetuum mobile.** — Es wird nun hier der Ort sein, etwas näher auf die berühmte Frage des Perpetuum mobile einzugehen, mit welcher sich schon so Viele beschäftigt haben und noch jetzt beschäftigen. Aber bevor wir das thun, ist es unerlässlich, uns vorerst klar zu machen, was man eigentlich unter einem Perpetuum mobile versteht.

Die Meisten, welche diese Frage nicht näher studirt haben, glauben natürlich, dass es sich bei derselben um einen Körper handle, welcher beständig in Bewegung ist. Desshalb findet man genug Solche, welche die Behauptung, dass die Entdeckung des Perpetuum mobile unmöglich sei, mit ungläubigem Kopfschütteln aufnehmen; man hört sie dagegen einwenden, dass ja z. B. die Erde in fortdauernder Bewegung um ihre Achse sowohl, als um die Sonne begriffen sei. Aber diejenigen, welche die Frage genauer kennen, und besonders diejenigen, welche selbst Anstrengungen gemacht haben, ihre Lösung zu finden, geben dem Perpetuum mobile eine ganz andere Bedeutung.

Wir haben gesagt, dass zur Bewegung einer Maschine, um die Widerstände, welche sich dieser Bewegung entgegensetzen, zu überwinden, fortwährend eine gewisse Kraft angewendet werden müsse; wir haben weiter hinzugefügt, dass diese Kraft gewöhnlich von einem thierischen Motor, oder von einem flies-

senden Wasser, oder vom Wind, oder von dem Dampf hergenommen wird. Wenn man aber das Perpetuum mobile sucht, so nimmt man sich vor, eine Maschine zu erfinden, welche, ohne Zuhilfenahme irgend eines dieser Motoren, noch irgend eines andern, in Thätigkeit bleiben kann; man sucht eine Kraftmaschine, welche eine Nutzarbeit hervorbringen kann, ohne der Wirkung eines Motors unterworfen zu sein; man will, mit einem Wort, eine Maschine construiren, welche ihr eigener Motor ist.

Man begreift nun das Interesse, welches diese Frage für diejenigen darbieten muss, welche glauben, dass ihre Lösung möglich ist, und welche Zeit und Geld opfern, die Lösung zu suchen. Die Maschinen haben stets einen Motor nöthig, um dem Menschen dienstbar zu sein. Lange Zeit hindurch waren die Menschen selbst, die Thiere, das Wasser, der Wind, die einzig angewandten Motoren. Aber die Anwendung der Menschen und Thiere zieht eine fortwährende Ausgabe nach sich; das Wasser und der Wind dagegen können nur in besonderen Lagen und Fällen angewandt werden. Die Zahl der vorhandenen Wasserkräfte ist begrenzt, und man kann sie nicht nach Belieben von Neuem schaffen; der Wind ist zwar eine der verbreitetsten Quellen der Bewegung, aber er bietet zu viele Unregelmässigkeiten in seiner Wirkung dar. Die Erfindung der Dampfmaschine hatte das unermessliche Verdienst, ein Mittel gegeben zu haben, überall und zu jeder Zeit einen Motor von beliebiger Stärke zur Verfügung haben zu können. Dabei erfordert die Anwendung einer Dampfmaschine zwar auch fortwährende Ausgaben, wie die der thierischen Motoren, aber dieser Aufwand, entspringend aus dem Verbrauch an Brennmaterial, ist in den meisten Fällen weit unterhalb desjenigen, welchen die Anwendung thierischer Motoren erfordern würde, wenn diese in solcher Anzahl angewendet würden, dass sie dieselbe Leistung hervorbrächten wie die Dampfmaschine. Aber diejenigen, welche das Perpetuum mobile suchen, wollen noch weiter gehen; sie wollen eine Maschine finden, welche dieselbe Aufgabe wie z. B. eine Dampfmaschine erfüllt, welche aber weiter keine wesentlichen Ausgaben erfordert als diejenigen, welche zu ihrer Instandhaltung nothwendig sind. Es ist wohl klar, dass derjenige, welcher eine solche Erfindung machen würde, eine unerschöpfliche Quelle von Reichthum damit gewinnen müsste; sie würde für ihn dem Stein der Weisen gleich zu achten sein, und daraus ist zu erklären, warum sich so Viele damit beschäftigt haben und noch jetzt damit beschäf-

tigen. Man kann selbst sagen, dass die Entdeckung des Perpetuum mobile derjenigen des Steins der Weisen unendlich vorzuziehen wäre. Derjenige, welcher das Mittel, Gold zu machen, erfände, würde sich selbst allerdings bereichern, aber ein erheblicher Nutzen für die ganze menschliche Gesellschaft würde daraus nicht hervorgehen. Das Gold wird weniger seiner selbst als des conventionellen Werthes wegen gesucht, welcher ihm beigelegt wird; dieser Werth würde sich aber sehr schnell vermindern, sobald man soviel davon produciren könnte, als man wollte. Die Entdeckung des Perpetuum mobile dagegen, würde der Industrie einen mächtigen Aufschwung geben; sie würde die Fabrikation einer Menge von Gegenständen, die dem Menschen nützlich und angenehm sind, mit viel geringeren Kosten ermöglichen; der Urheber einer solchen Erfindung würde in Wahrheit ein Wohlthäter der Menschheit werden.

Aber unglücklicherweise ist diese Erfindung nicht möglich; und wohl verstanden, wir wollen damit nicht sagen, dass sie nur dem Menschen, bei den beschränkten Mitteln, über welche er verfügen kann, unmöglich sei; sie ist eine absolute Unmöglichkeit. Die Wahrheit dieser Behauptung kann ganz ebenso streng bewiesen werden, wie die Sätze der Geometrie; sie folgt aus den Principien, welche wir bisher aufgestellt haben. Wir haben gesehen, dass die Bewegungsarbeit, welche während der ganzen Dauer der Bewegung einer Maschine geleistet werden muss, niemals kleiner als die gesammte Widerstandsarbeit sein kann, welche während desselben Zeitraums von der Maschine entwickelt wird. Die erstere Arbeit ist gewöhnlich gleich der letzteren; sie muss aber sogar grösser als diese sein, wenn Stösse stattfinden, welche einen Theil der Bewegungsarbeit zerstören. Eine Maschine kann folglich keine Art von Nutzarbeit hervorbringen, wenn sie nicht der Wirkung einer Kraft unterliegt, welche eine Menge von Bewegungsarbeit hervorbringt, die gleich ist der zu erzeugenden Nutzarbeit, vermehrt um die Arbeit der passiven Widerstände, welche stets die Anwendung der Maschine mit sich bringt. Eine Maschine dient nur dazu, die Wirkung des Motors in solcher Weise zu übertragen, dass sie zur beabsichtigten Ueberwindung von Widerständen passend wird; durch diese Uebertragung vermehrt sich die Gesammtarbeit, welche der Motor leistet, niemals, sie vermindert sich vielmehr allemal, da die passiven Widerstände, welche durch die Bewegung hervorgerufen werden, einen Theil derselben absorbiren.

§. 247. Wenn man die verschiedenen Versuche prüft, welche angestellt worden sind, um die Erfindung, mit welcher wir uns eben beschäftigen, zu machen, so sieht man, dass fast allgemein die Bewegung mittelst eines Körpers, der eine gewisse Höhe herabfällt, hervorgebracht werden sollte. Dieser Körper sollte alsdann durch die Maschine selbst wieder auf die Höhe gehoben werden, von welcher er herabgefallen war, als er seine Nutzarbeit leistete, um sofort wieder herabzufallen u. s. w. f. Vorausgesetzt, dass es möglich wäre, eine Maschine herzustellen, welche dieses leistet, so sieht man, dass derselbe schwere Körper, indem er abwechselnd herabfällt und wieder empor steigt, die Bewegung so lange als man wollte forterhalten und daher eine unendliche Menge von Nutzarbeit leisten würde.

Die Formen, unter welchen man eine solche Maschine herzustellen suchte, sind sehr verschieden. In dem einen Fall war dieselbe ein Wasserrad, das durch Wasser in Bewegung gesetzt wurde, welches sich in einem oberhalb desselben aufgestellten Reservoir befand. Das Rad sollte Pumpen in Bewegung setzen, welche alles Wasser, welches auf das Rad gewirkt hatte, in das Reservoir zurück- und ausserdem noch eine gewisse Menge Wasser mehr zu irgend einer Benützung heben sollten.

In einem andern Fall wandte man ein Rad an, das wie ein Sperrrad einer Uhr gestaltet war und gleichgrosse Stäbe trug, die in den Winkeln, welche die Zähne bilden, wie in Scharniren beweglich waren (Fig. 366). Diese Stäbe endigten sich in Kugeln, die alle gleichschwer waren. Wenn dieses Rad im Sinne des Pfeils gedreht wird, so nimmt jeder Stab in dem Winkel, in welchem er befestigt ist, in Folge der Wirkung der Schwerkraft, die seinen Schwerpunkt immer möglichst tief zu stellen sucht, nach und nach verschiedene Lagen ein. Nach der Idee des Erfinders dieses Rads soll sich die Bewegung desselben aus dem Grunde von selbst erhalten und sogar noch zugleich Widerstände, welche an ihm angebracht sind, überwinden können, weil die abwärts gehenden Kugeln weiter von der Vertikalen entfernt sind, welche durch die Achse

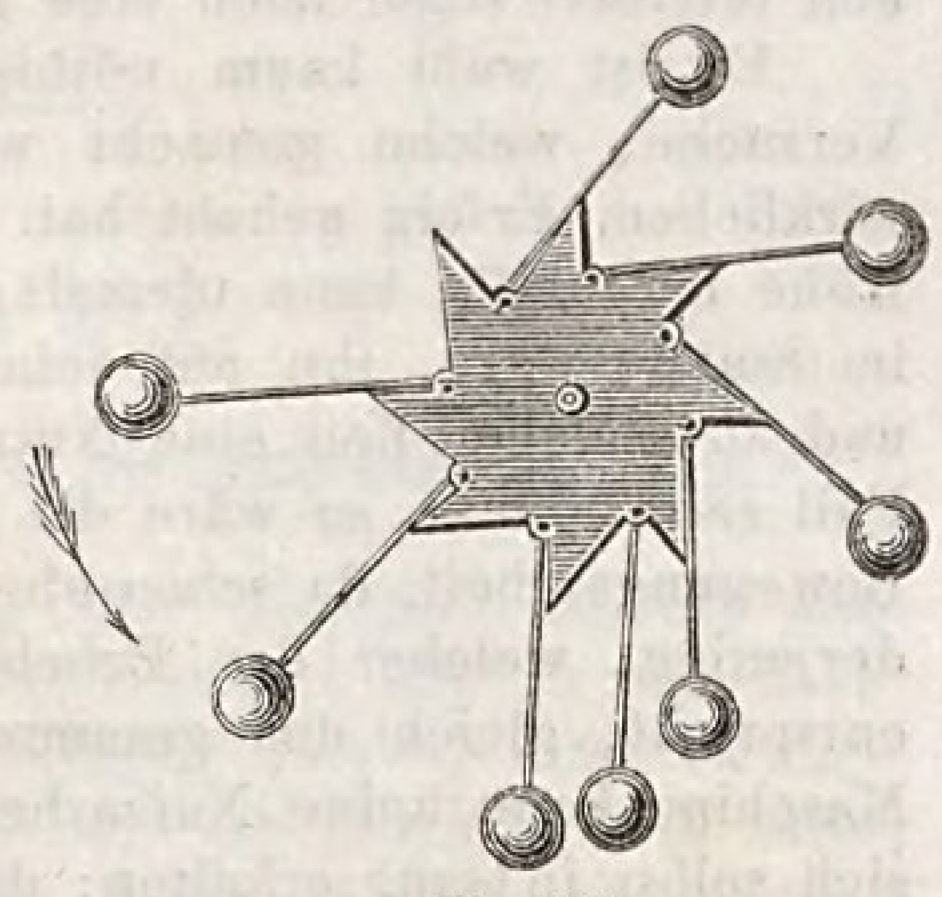


Fig. 366.

des Rads geht, als die aufwärts steigenden, und daher einen grösseren Hebelarm haben.

Wieder in einem anderen Fall nahm man einen trogartigen Kasten AA (Fig. 367), der sich um eine Achse B drehen kann und Quecksilber enthält. Zwei feste Stützen D, E dienen dazu, das Gefäss in seiner drehenden Bewegung aufzuhalten, sodass es nur oscilliren kann, indem es sich abwechselnd gegen die eine oder die andere dieser Stützen anlegt.

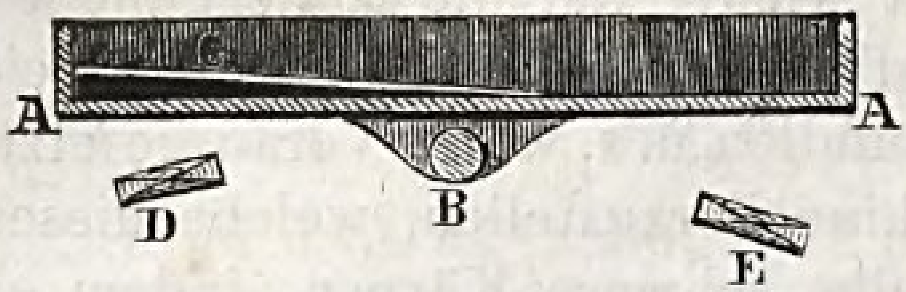


Fig. 367.

Wenn sich das Gefäss nach der einen Seite neigt, so fliesst das Quecksilber nach dieser Seite und sucht seine Bewegung zu beschleunigen, bis es gegen die eine der beiden Stützen stösst. Die Bewegung, welche das Gefäss auf diese Weise annimmt, überträgt sich mit Hilfe von Zahnrädern auf ein Schwungrad, welches dadurch eine beschleunigte Bewegung erhält. Dieses Schwungrad wirkt hierauf auf einen Hebel, welcher das Quecksilber wieder hebt, indem er das Gefäss nicht blos wieder in horizontale Lage versetzt, sondern auch noch nach der entgegengesetzten Seite etwas neigt. Das Quecksilber läuft dadurch auf die andere Seite, und der neue Anstoss, welchen es dadurch dem Schwungrad ertheilt, soll die Bewegung desselben erhalten, sodass es das Quecksilber wiederum erhebt u. s. w. Die oscillirende Bewegung, welche das Gefäss in dieser Weise annimmt, soll eine fortdauernde rotirende Bewegung des Schwungrads hervorbringen und letzteres sogar noch eine gewisse Nutzarbeit leisten können.

Es ist wohl kaum nöthig hinzuzufügen, dass keiner der Versuche, welche gemacht worden sind, obige Ideen zu verwirklichen, Erfolg gehabt hat. Ein Körper, welcher eine gewisse Höhe herabfällt, kann niemals eine Bewegung hervorbringen, die im Stande wäre, ihn auf seinen Ausgangspunkt zurückzuheben und zu gleicher Zeit eine Nutzarbeit zu leisten. Wenn dies der Fall sein könnte, so wäre die Widerstandsarbeit grösser als die Bewegungsarbeit, da schon ein Theil der Widerstandsarbeit allein, derjenige, welcher der Erhebung des herabgefallenen Körpers entspricht, gleich der gesammten Bewegungsarbeit wäre. Die Maschine kann keine Nutzarbeit leisten, sie kann nicht einmal sich selbst in Gang erhalten; denn schon im letzteren Fall würde die Widerstandsarbeit die Bewegungsarbeit noch um die ganze Arbeit übertreffen, welche den passiven Widerständen entspricht, eine Arbeit, welche man wohl vermindern, niemals aber ganz beseitigen kann. In dem ersten der drei Beispiele, welche wir

oben angeführt haben, kann das Wasserrad nur unter der Voraussetzung in Gang bleiben, dass die Pumpen in das Reservoir nur einen Theil des Wassers wieder zurückheben, welches zur Bewegung des Rades gedient hat. In dem zweiten Beispiel wirken allerdings die Kugeln, welche abwärts gehen, wenn die Bewegung im Sinne des Pfeils erfolgt, an dem Ende eines grösseren Hebelarms als die anderen; aber diese letzteren sind zahlreicher, sodass dadurch eine Compensation der Wirkung der ersteren erfolgt, wenn auch nicht in jedem Augenblick, so doch im Mittel während einer ganzen Umdrehung des Rads. In dem dritten Beispiel bringt das Gefäss, indem es sich auf die Seite neigt, eine Bewegung hervor, die in Berücksichtigung der passiven Widerstände nicht einmal ganz ausreicht, es wieder in die horizontale Lage zu erheben, viel weniger, um es noch etwas auf die entgegengesetzte Seite zu neigen und dadurch das Quecksilber wieder in Fluss zu bringen.

Alle diese Versuche sind, wie wir schon gesagt haben, auf die Lehren des Gleichgewichts gegründet, besonders auf diejenigen des Gleichgewichts am Hebel, ohne dass diese Lehren durch die Betrachtung der Maschinen im Zustande der Bewegung vervollständiget worden wären. Wenn man sich des Satzes klar bewusst ist, dass bei fortgesetzter Bewegung einer Maschine stets die Bewegungsarbeit mindestens gleich der Widerstandsarbeit sein muss (§. 101), so wird man sich niemals mit vergeblichen Anstrengungen bemühen, das Perpetuum mobile erfinden zu wollen.

Anhang.

Von der Festigkeit der Materialien.*)

§. 248. **Formveränderung der Körper durch die Kräfte.** — Wie bereits wiederholt bemerkt (§§. 25 und 154), suchen die Kräfte, die an einem Körper wirken, zunächst diejenigen Moleküle desselben, an denen sie angreifen, in ihrer eigenen Richtung fortzuführen. In Folge des Zusammenhangs dieser Moleküle aber mit den übrigen des Körpers übertragen sich die Kräfte auch auf diese, nicht aber ohne eine Gestalts-

*) Grösstentheils nach *Redtenbacher*: „Der Maschinenbau.“ 1. Bd.

veränderung des Körpers hervorzubringen. Aber die Bestandtheile einer Maschine sollen ihre Form unter dem Einfluss der wirkenden Kräfte nur sehr unmerklich und bleibend, d. h. nach Aufhören der Wirksamkeit jener Kräfte, gar nicht ändern. Zu diesem Behufe dürfen ihre Dimensionen oder Stärken nicht unter eine gewisse Grenze herabgehen; es ist der Zweck dieses Abschnitts, wenigstens in den einfacheren Fällen, die Methoden kennen zu lernen, nach welchen man verfahren muss, um jene Stärken der Maschinentheile aufzufinden, wenn die wirkenden Kräfte bekannt sind, oder umgekehrt, diejenigen grössten Kräfte kennen zu lernen, welche man gegebenen Maschinentheilen zumuthen darf.

Die Gestaltsveränderungen, welche die Körper durch die Kräfte erfahren, hängen sowohl von der ursprünglichen Gestalt der Körper selbst, als von der Angriffsweise der Kräfte ab. Die einfachsten Fälle sind die, wo ein stabförmiger Körper seiner Länge nach auseinander zu ziehen (auszudehnen), oder wo ein nicht zu langes oder zu hohes Stück zusammen zu drücken gesucht wird. Zusammengesetzter sind schon die Fälle, wo Moleküle eines Körpers gegen einander verschoben werden; noch verwickelter sind Biegungen, wo Ausdehnungen und Zusammenziehungen, Verdrehungen, wo Verschiebungen in veränderlichem Maasse und endlich gar Biegungen mit Verdrehungen, wo alle drei Fälle zugleich und zwar in sehr verschiedenen Graden vorkommen.

Wenn die Gestaltsveränderung eines Körpers ein gewisses Maass überschreitet, so werden entweder alle, oder in der Regel blos ein Theil der Moleküle eines Körpers so weit aus ihren bisherigen Gleichgewichtslagen in dem Körper entfernt, dass eine Trennung derselben von den übrigen eintritt. Man sagt dann, die Festigkeit des Materials sei überwunden worden.

§. 249. **Ausdehnung stabförmiger Körper.** — Wenn man das eine Ende eines stabförmigen Körpers einspannt und an dem anderen Ende eine Kraft nach der Längenrichtung des Stabs wirken lässt, so wird der Stab verlängert; gleichzeitig tritt zwar auch eine Zusammenziehung des Stabes nach der Quere ein, doch ist diese in den meisten praktischen Fällen so gering, dass man sie vernachlässigen kann. Bei lebhafter Vorstellung des Vorgangs, welcher bei jener Ausdehnung stattfindet, wird man es wahrscheinlich finden, dass die Verlängerung e des Stabes proportional seiner Länge l, proportional der an ihm thätigen Kraft P und umgekehrt, proportional seinem Quer-

schnitt a sein, ausserdem aber auch noch von der Natur des Materials abhängen wird. Bezeichnet man mit ε eine Zahl, die diese letztere Abhängigkeit ausdrückt, so ist demnach zu setzen

$$e = \frac{Pl}{a\varepsilon}.$$

Die Bedeutung dieser Zahl ε, welche der Elasticitäts-Modulus heisst, ist leicht zu erklären. Denkt man sich an einem Stab vom Querschnitt 1 (1 Quadratcentimeter) eine so grosse Kraft wirken, dass er um sich selbst verlängert, also $e = l$ wird, so muss $P = \varepsilon$ sein. ε drückt also diejenige Kraft aus, durch welche ein Stab von 1 Quadratcentimeter Querschnitt um seine eigene Länge, die er vor der Ausdehnung besass, ausgedehnt wird. — Nun ist freilich eine so enorme Ausdehnung bei fast keinem Material, das wir kennen, möglich, ohne dass ein gänzliches Zerreissen eintritt. Noch weniger würde sich das in obiger Gleichung ausgesprochene Gesetz auf so weite Grenzen ausdehnen lassen: es gilt vielmehr strenge nur für verhältnissmässig sehr geringe Ausdehnungen. Aber für solche hat es sich in hundert- und tausendfachen Erfahrungen bestätigt, d. h. man hat für dasselbe Material immer den gleichen Werth für ε gefunden, wie man auch die 4 Grössen P, b, a, e abändern mochte.

In der weiter untenstehenden Tabelle 14 ist für einige der wichtigsten Materialien in der mit „Elasticitäts-Modulus ε" überschriebenen Columne der Werth dieser Zahl enthalten, und zwar für den Quadratcentimeter als Querschnittseinheit und für das Kilogramm als Gewichtseinheit.

B e i s p i e l. An der schmiedeisernen, 2 Meter langen und 16 Quadratcentimeter im Querschnitt haltenden Zugstange einer Eisenbrücke wirkt eine Kraft von 5000 ^{k}. Um wie viel verlängert sich dieselbe?

$$e = \frac{5000 \times 2}{16 \times 2020000} = 0{,}000309^{\,m} = 0{,}309^{\,mm}.$$

In obiger Formel drückt $\frac{P}{a}$ die auf die Querschnittseinheit des Stabes treffende Belastung oder Spannung aus; man nennt diese Zahl manchmal auch S p a n n u n g s i n t e n s i t ä t. Bezeichnet man sie mit J, so ist

$$e = \frac{Jl}{\varepsilon} \text{ und } J = \frac{e}{l}\varepsilon.$$

So ist z. B. die Spannungsintensität in einem Stab oder Balken von Tannenholz, der um den 5000. Theil seiner Länge ausgedehnt wird $\left(\frac{e}{l} = \frac{1}{5000}\right)$

$$J = \frac{129280}{5000} = 25{,}8^{\,k}.$$

§. 250. **Absolute Zugfestigkeit der Stäbe.** — Wenn ein Stab so stark ausgedehnt wird, bis er zerreisst, so heisst man die hiezu pro Querschnittseinheit nöthige Kraft, also die erforderliche Spannungsintensität, die absolute Festigkeit des Stabs. Bezeichnet man sie mit A, so ist diejenige Kraft, welche nothwendig ist, um einen Stab vom Querschnitt a abzureissen, a mal so gross, also

$$K = \mathfrak{A}a.$$

Es ist natürlich, dass dieses $\mathfrak{A}$ für jeden Körper einen besonderen Werth hat. Die mit „Absolute Zugfestigkeit A" überschriebene Columne der unten stehenden Tabelle 14 enthält die mittleren Werthe von $\mathfrak{A}$ für die wichtigsten Materialien, für den Quadrat-Centimeter als Querschnittseinheit, in Kilogrammen.

Beispiel. Durch welche Kraft wird ein Eisendraht von 1 Quadrat-Millimeter Querschnitt abgerissen?

$$K = 6464 \times \frac{1}{100} = 64{,}64^{k}.$$

§. 251. **Zusammendrückung kurzer stabförmiger Körper.** — Versuche über die Zusammendrückung kurzer Stäbe haben gezeigt, dass die Grösse der Zusammendrückung, so lange eine gewisse Grenze nicht überschritten wird, gleichfalls proportional der wirkenden Kraft, proportional der Länge des Stabs und umgekehrt proportional dem Querschnitt ist, wie bei der Ausdehnung, und dass sogar der Modulus der Elasticität innerhalb derselben Grenzen denselben Werth wie für die Ausdehnung behält. Desshalb gelten die oben für die Ausdehnung aufgestellten beiden Formeln auch hier:

$$e = \frac{Pl}{a\varepsilon}$$

$$\text{und } J = \frac{e}{l}\varepsilon,$$

wo J nun passend Druckintensität genannt wird und für ε dieselben Werthe zu gebrauchen sind, wie sie in der 2. Columne der untenstehenden Tabelle 14 für die Ausdehnung angegeben worden sind.

§. 252. **Absolut rückwirkende Festigkeit der Materialien** nennt man die Kraft, welche nothwendig ist, einen Würfel vom Einheitsquerschnitt (1 Quadratcentimeter) zu zerdrücken. Ist desshalb a der Querschnitt eines kurzen Körpers, der zu zerdrücken ist, so ist die dazu nöthige Kraft, mit $\mathfrak{R}$ jene rückwirkende Festigkeit bezeichnet,

$$K = \mathfrak{R}a.$$

Die rückwirkende Festigkeit ist bei den meisten Hölzern durchschnittlich die Hälfte, bei Schmiedeisen $^4/_5$ der absoluten Festigkeit gegen das Abreissen; bei Gusseisen dagegen ist die rückwirkende Festigkeit $5^1/_2$ mal so gross als die absolute. In der Tabelle 14 ist in der mit „Rückwirkende Festigkeit R" überschriebenen Columne diese Grösse im Verhältniss zu der A angegeben.

Beispiel. Welche Kraft ist erforderlich, um einen Block von Eichenholz von 1 Quadratdecimeter Querschnitt zu zerdrücken?

$$K = \frac{2}{3} \cdot 808 \times 100 = 53867^{k}.$$

§. 253. **Elasticitätsgrenze.** — So lange die Ausdehnung und Zusammendrückung eines Körpers nur gering ist, kehrt er nach Aufhören der Kräfte, welche jene Gestaltsveränderungen veranlasst haben, vollständig in seine vorige Gestalt wieder zurück: er ist innerhalb gewisser Grenzen (wenigstens kann man dies in der Praxis immer so annehmen) vollkommen elastisch. Wird aber jene Grenze, Elasticitätsgrenze genannt (vgl. §. 7), überschritten, so behalten die Körper eine bleibende Ausdehnung oder Zusammendrückung. Begreiflich ist die Kenntniss dieser Elasticitätsgrenze für die Technik ausserordentlich wichtig. Eigentlich sollte ein Körper nie so stark belastet werden, dass diese Grenze überschritten würde. In nebenstehender Tabelle 14 enthalten die mit „Elasticitätsgrenze für Zug und Druck", α_1, β_1 überschriebenen Columnen die Bruchtheile, um welche man die Materialien ausdehnen und zusammendrücken darf, bis die Elasticitätsgrenze erreicht ist. Die mit $\mathfrak{A}_1$ und $\mathfrak{R}_1$ überschriebenen Columnen geben die Spannungs- und Druckintensitäten in Theilen der absoluten Zugfestigkeit an dieser Stelle.

Beispiel. Mit wie viel darf ein 1 Quadratmillimeter starker und 1 Meter langer Eisendraht belastet werden, bis seine Elasticitätsgrenze erreicht ist, und um wie viel dehnt er sich aus?

Die Belastung ist: $0{,}4 \times 6464 \times \frac{1}{100} = 25{,}856^{k}$.

Die Ausdehnung beträgt: $\frac{1}{843} \times 1^{m} = 0{,}00119^{m} = 1{,}19^{mm}$.

(Tabelle 14 s. auf der folgenden Seite.)

§. 254. **Abscheerung.** — Wenn man sich an einem kurzen stabförmigen Körper, einem Bolzen z. B. (Fig. 368), Kräfte auf die beiden durch den Querschnitt A getrennten kurzen Theile a, b in entgegengesetzten Richtungen so wirkend denkt, dass die Moleküle in der Querschnittsebene A parallel zu dieser gegenseitig verschoben werden, so sagt man, der Körper sei auf seine

Tabelle 14. Erfahrungsresultate über die Elasticität und Festigkeit der Materialien.

Nach *Rebhann* („Theorie der Holz- und Eisenconstruktionen") und *Redtenbacher* („Resultate für den Maschinenbau").

Material.	Elasticitäts-Modulus ε.	Absolute Zugfestigkeit. $\mathfrak{A}$.	Rückwirkende Festigkeit $\mathfrak{R}$.	Elasticitätsgrenze für Zug α_1	Elasticitätsgrenze für Druck β_1	Zug- u. Druck-Intensität an der Elasticitätsgrenze $\mathfrak{A}_1$	Zug- u. Druck-Intensität an der Elasticitätsgrenze $\mathfrak{R}_1$	Bruchfestigk.-Coëfficient $\mathfrak{B}$.	Torsionsfestigkeits-Coëfficient $\mathfrak{W}$.
Schmiedeeisen . .	2020000	4040	$\frac{4}{5}\,\mathfrak{A}$	$\frac{1}{1250}$	$\frac{1}{1250}$	$\frac{2}{5}\,\mathfrak{A}$	$\frac{2}{5}\,\mathfrak{A}$	4000	4500 (dünn) — 7000 (dick)
Eisenblech . . .	1779600	3636	$\frac{4}{5}\,\mathfrak{A}$	$\frac{1}{1222}$	$\frac{1}{1222}$	$\frac{1}{3}\,\mathfrak{A}$	$\frac{1}{3}\,\mathfrak{A}$	7000	—
Eisendraht . . .	2181600	6464	$\frac{4}{5}\,\mathfrak{A}$	$\frac{1}{843}$	$\frac{1}{843}$	$\frac{2}{5}\,\mathfrak{A}$	$\frac{2}{5}\,\mathfrak{A}$	—	—
Gusseisen . . .	1010000	1454	$5\frac{1}{2}\,\mathfrak{A}$	$\frac{1}{1562}$	$\frac{1}{521}$	$\frac{4}{9}\,\mathfrak{A}$	$\frac{4}{3}\,\mathfrak{A}$	3000	3000
Stahl, mittl. Qual.	3000000	7500	—	—	—	—	—	—	7500
Tannenholz . . .	129280	970	$\frac{1}{2}\,\mathfrak{A}$	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{666}$	$\frac{1}{4}\,\mathfrak{A}$	$\frac{1}{5}\,\mathfrak{A}$	600	240
Fichtenholz . . .	121200	808	$\frac{1}{2}\,\mathfrak{A}$	$\frac{1}{536}$	$\frac{1}{714}$	$\frac{1}{4}\,\mathfrak{A}$	$\frac{1}{5}\,\mathfrak{A}$	—	—
Kiefern	129280	1050	$\frac{1}{2}\,\mathfrak{A}$	$\frac{1}{444}$	$\frac{1}{592}$	$\frac{1}{4}\,\mathfrak{A}$	$\frac{1}{5}\,\mathfrak{A}$	—	—
Lerchenholz . .	129280	1131	$\frac{1}{2}\,\mathfrak{A}$	$\frac{1}{400}$	$\frac{1}{533}$	$\frac{1}{4}\,\mathfrak{A}$	$\frac{1}{5}\,\mathfrak{A}$	—	—
Eichenholz . . .	121200	808	$\frac{2}{3}\,\mathfrak{A}$	$\frac{1}{469}$	$\frac{1}{563}$	$\frac{1}{3}\,\mathfrak{A}$	$\frac{1}{4}\,\mathfrak{A}$	700	280
Hanfseile . . .	—	510	—	—	—	—	—	—	—

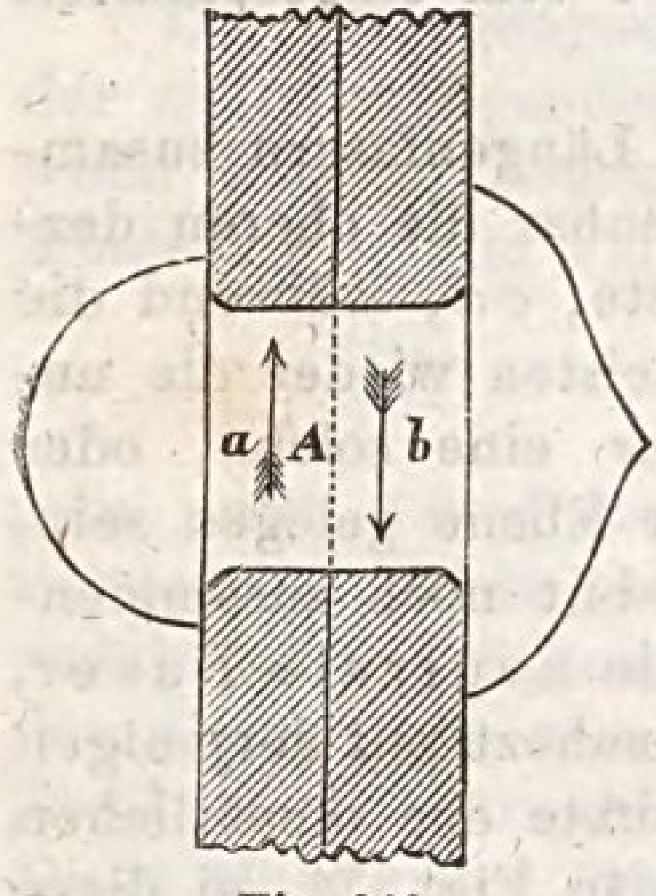


Fig. 368.

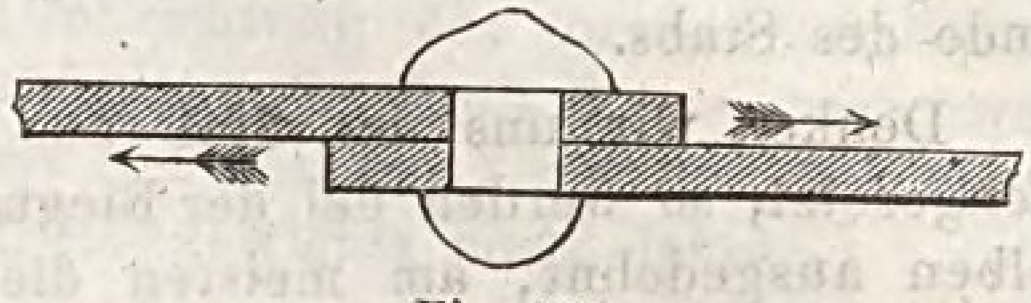


Fig. 369.

A b s c h e e r u n g s f e s t i g k e i t angegriffen. Bei nur kleinem Querschnitt des Stabs wird es wahrscheinlich, dass die zum Abscheeren desselben erforderliche Kraft dem Querschnitt proportional ist; und dies wurde in der That durch die Erfahrung nahezu bestätigt. Ebenso liess sich voraussehen und hat es sich auch bestätigt, dass bei Metallen die zum Abscheeren jedes Quadrat-Centimeters erforderliche Kraft, d. h. die A b s c h e e r u n g s f e s t i g k e i t, nahezu der absoluten Zugfestigkeit proportional ist.

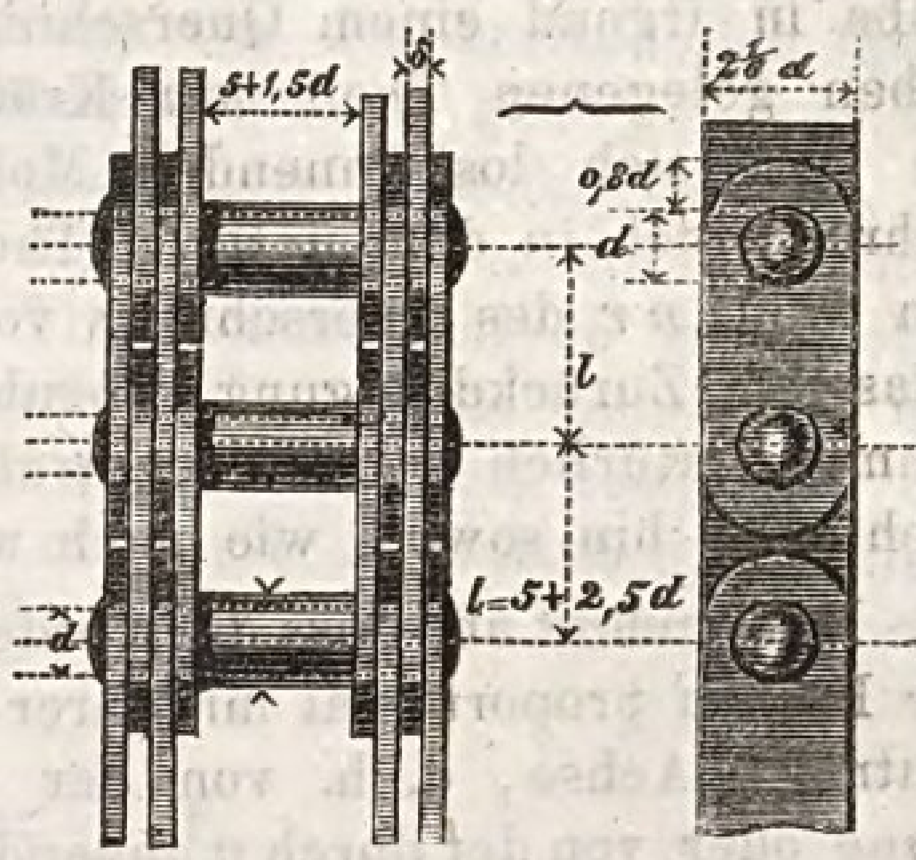


Fig. 370.

Die Abscheerungsfestigkeit kommt besonders bei Nieten und Kettenbolzen in Anwendung (Figuren 369 und 370).

§. 255. **Biegung eines Stabes.** — Von den verschiedenen Arten, auf welche ein Stab gebogen werden kann, betrachten wir zunächst die einfachste: Der im ungebogenen Zustande gerade Stab von beliebigem Querschnitt sei an seinem einen Ende a fest eingespannt (Fig. 371), an seinem anderen Ende b wirke eine Kraft P, welche die Biegung hervorbringt. Doch sei diese Biegung nur gering, so gering, dass wir annehmen dürfen, die Kraft P

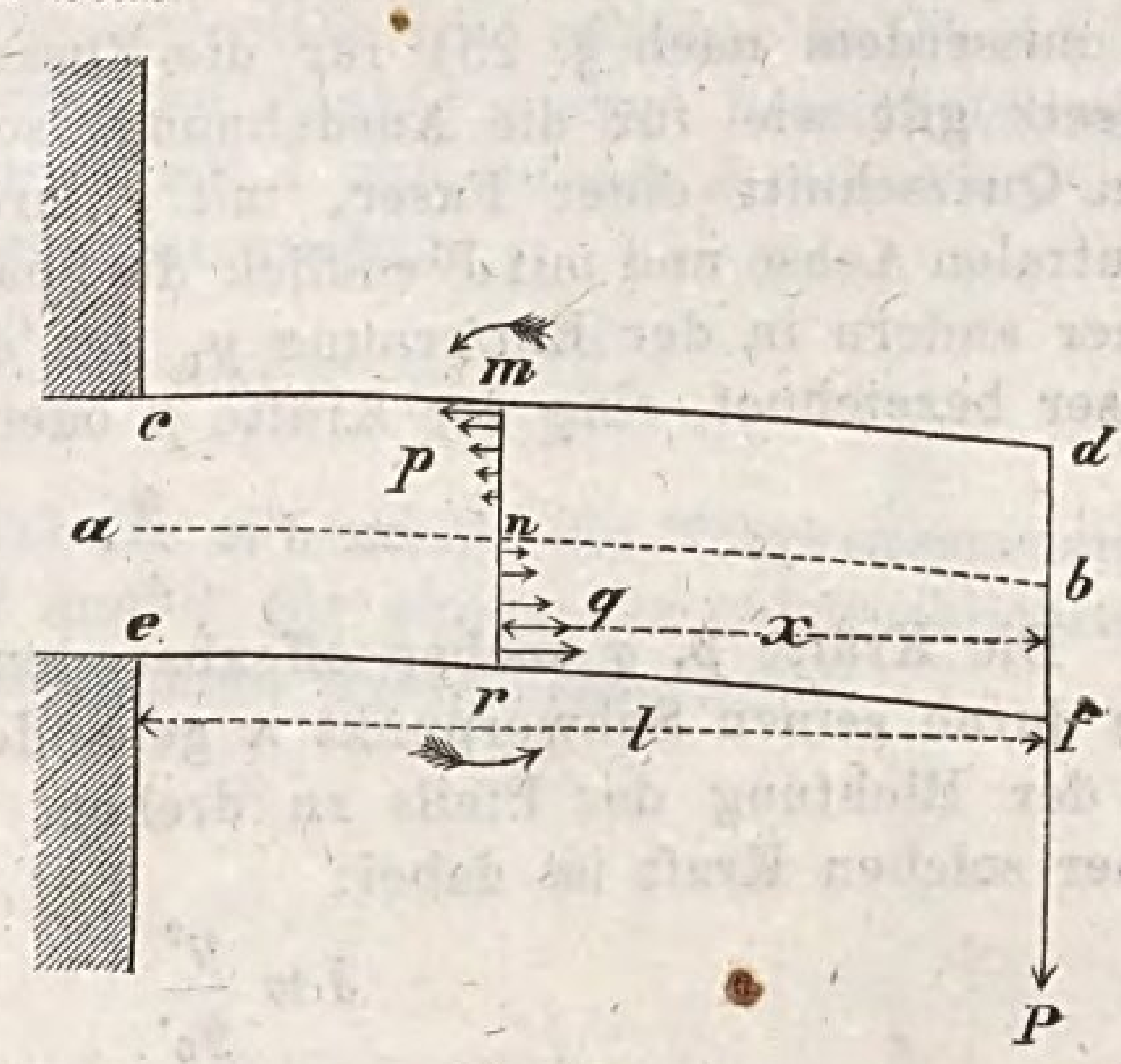


Fig. 371.

behalte immer dieselbe Entfernung $ab = l$ vom eingespannten Ende des Stabs.

Denken wir uns den Stab aus lauter Längenfasern zusammengesetzt, so werden bei der Biegung offenbar die oberen derselben ausgedehnt, am meisten die oberste, cd, während die unteren zusammengedrückt werden, am meisten wieder die unterste, ef. Zwischen diesen muss offenbar eine solche, oder eigentlich eine ganze Reihe in horizontaler Ebene gelegen sein, welche zwar gebogen, aber weder ausgedehnt noch zusammengedrückt wird. Man nennt sie desshalb die neutrale Faser, und die Erfahrung hat gezeigt, dass sie sehr nahezu mit derjenigen zusammenfällt, welche durch die Schwerpunkte der sämmtlichen Querschnitte des Stabs hindurch geht. ab in Fig. 371 sei diese neutrale Faser, dann ist klar, dass sich bei der Biegung des Stabs in irgend einem Querschnitt mnr in dem oberhalb derselben gelegenen Theil mn Kräfte p geltend machen, welche die dort sich lostrennenden Moleküle zurückzuhalten suchen, während sich in dem unteren Theil np Kräfte q zeigen, welche den Theil nr des Querschnitts von der durch die Biegung veranlassten Zurückdrängung abzuhalten streben. Diese Kräfte nehmen natürlich von der neutralen Faser aus, wo sie Null sind, nach oben hin sowohl wie nach unten zu.

Man nimmt an, dass die Ausdehnung und Zusammendrückung der Fasern proportional mit ihrer vertikalen Entfernung von der neutralen Achse, d. h. von der durch ab gelegten Horizontalebene oder von der durch n gehenden Querhorizontallinien wächst. In demselben Verhältniss stehen dann obige Kräfte p und q, und da ausserdem nach §. 251 für die Zusammendrückung dasselbe Gesetz gilt wie für die Ausdehnung, so ist, wenn man mit w den Querschnitt einer Faser, mit y ihre Entfernung von der neutralen Achse und mit J endlich die Spannungsintensität irgend einer andern in der Entfernung y_0 von der neutralen gelegenen Faser bezeichnet, eine der Kräfte p oder q

$$= J\,w\,\frac{y}{y_0}.$$

Die Kräfte p, q suchen offenbar den Querschnitt mnp, um die durch seinen Schwerpunkt n gehende horizontale Querachse in der Richtung des Pfeils zu drehen. Das statische Moment einer solchen Kraft ist dabei:

$$J\,w\,\frac{y^2}{y_0}.$$

Die entgegengesetzte Drehrichtung übt durch Vermittlung der zwischenliegenden Querschnitte die Kraft P aus, und zwar, wenn man das Stück nb mit x bezeichnet, mit dem statischen Moment Px. Im Fall des Gleichgewichts muss daher

$$\mathrm{P}x = \frac{\mathrm{J}}{y_0} \Sigma w y^2$$

sein, unter $\Sigma w y^2$ die Summe der Produkte $w y^2$ für alle Fasern verstanden. Diese Summe hat viele Aehnlichkeit mit derjenigen, welche man Trägheitsmoment nennt (§. 146). Denkt man sich den Querschnitt $m n p$ von bestimmter Dicke, so enthält der Theil w, welcher auf eine Faser trifft, eine bestimmte Masse. Diese Masse wird erhalten, wenn man die in der Querschnittseinheit enthaltene, μ, mit w multiplicirt. Und diese Masse wieder mit dem Quadrat ihrer Entfernung von der horizontalen Querachse n multiplicirt und die Produkte addirt, gäbe offenbar das Trägheitsmoment der materiell gedachten Querschnittsfläche. In der so erhaltenen Summe ist aber die Zahl μ ein constanter Faktor und kann daher jenes Trägheitsmoment so geschrieben werden: $\mu \Sigma w y^2$. In der Theorie der Festigkeit nennt man nun gewöhnlich schon die Summe $\Sigma w y^2$, ohne den Faktor μ, das T r ä g h e i t s m o m e n t d e s Q u e r s c h n i t t s. Behalten wir diese Benennung hier bei und bezeichnen das in Rede stehende Trägheitsmoment mit T, so ist also

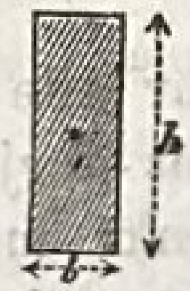
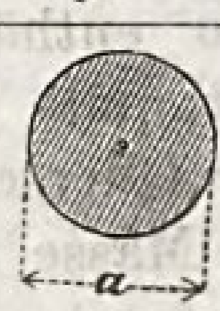
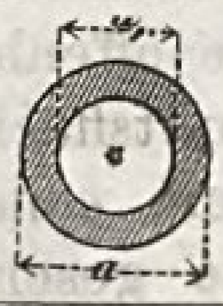
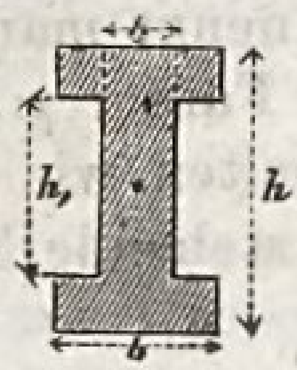
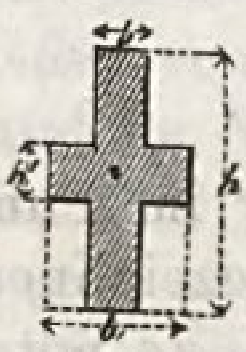
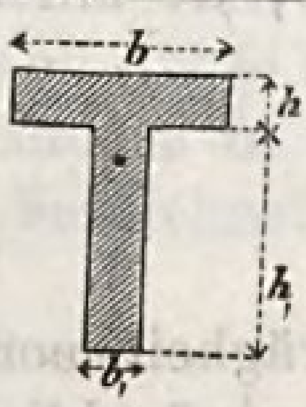
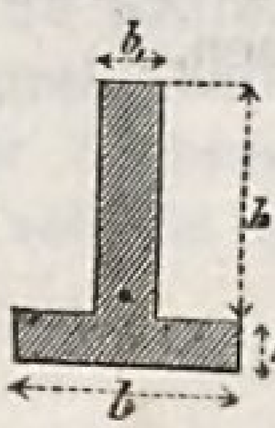
$$\mathrm{P}x = \frac{\mathrm{J}}{y_0} \mathrm{T}.$$

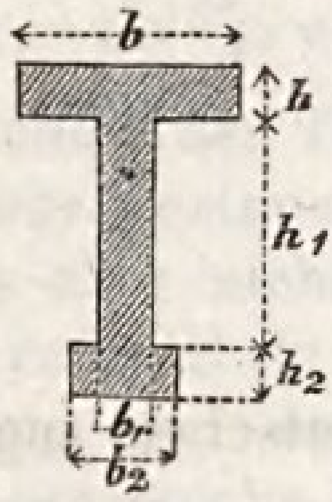
Die grösste Spannungsintensität tritt offenbar im Punkte c, die grösste Druckintensität im Punkte e ein. Bezeichnet man die ganze Länge des Stabs mit l und ac mit d, ae mit d', so sind offenbar jene grössten Intensitäten

$$\mathrm{J} = \frac{\mathrm{P}\,l\,d}{\mathrm{T}} \text{ und } \mathrm{J}' = \frac{\mathrm{P}\,l\,d'}{\mathrm{T}}.$$

Die nachstehende Tabelle 15 enthält die Trägheitsmomente T und die Werthe für d und d' für einige der gebräuchlichsten und in der Tabelle verzeichneten Querschnittsformen.

Tab. 15. Trägheitsmomente und Abstände der Schwerpunkts-Faser von der obersten und untersten.

Quer-schnitte.	Abstände der Schwerpunktsfaser von der obersten und untersten und Trägheitsmomente.
1) 	$d = \frac{1}{2}h$; $d' = \frac{1}{2}h$ $T = \frac{1}{12}bh^3$.
2) 	$d = \frac{1}{2}a$; $d' = \frac{1}{2}a$ $T = \frac{\pi}{64}a^4$.
3) 	$d = \frac{1}{2}a$; $d' = \frac{1}{2}a$ $T = \frac{\pi}{64}(a^4 - a_1^{\,4})$.
4) 	$d = \frac{1}{2}h$; $d' = \frac{1}{2}h$ $T = \frac{1}{6h}\left[b_1 h_1^{\,3} + b(h^3 - h_1^{\,3})\right]$.
5) 	$d = \frac{1}{2}h$; $d' = \frac{1}{2}h$ $T = \frac{1}{12}\left[b_1 h_1^{\,3} - b(h^3 - h_1^{\,3})\right]$.
6) 	$d = \frac{1}{2}\frac{bh^2 + b_1h_1^{\,2} + 2b_1hh_1}{bh + b_1h_1}$; $d' = h + h_1 - d$ $T = \frac{1}{3}\left\{b\left[d^3 - (d-h)^3\right] + b_1\left[(d-h)^3 + (h+h_1-d)^3\right]\right\}$
7) 	$d = \frac{1}{2}\frac{bh^2 + b_1h_1^{\,2} + 2bhh_1}{bh + b_1h.}$; $d' = h + h_1 - d$ $T = \frac{1}{3}\left\{b\left[(h+h_1-d)^3 - (h_1-d)^3\right] + b_1\left[d^3 + (h_1-d)^3\right]\right\}$

Querschnitte.	Abstände der Schwerpunktsfaser von der obersten und untersten und Trägheitsmomente.
8) 	$d = \frac{1}{2}\,\frac{bh^2 + b_1h_1{}^2 + b_2h_2{}^2 + 2(b_1hh_1 + b_2h_2(h+h_1);}{bh + b_1h_1 + b_2h_2}$ $d' = h_1 + h_2 - d$ $T = \frac{1}{3}\left\{ \begin{array}{l} b\left[d^3 + (h-d)^3\right] + b_1\left[(d-h)^3\right. \\ \left. + (h+h_1-d)^3\right] + b_2 . \\ \left[(h + h_1 + h_2 - d)^3\right. \\ \left. - (h+h_1-d)^3\right]. \end{array} \right\}$

Beispiel. Für den Querschnitt Nr. 6 obiger Tabelle sei $h = 1$ Centimeter, $b = 4^{cm}$; $b_1 = 1^{cm}$ und $h_1 = 4^{cm}$. Dann ist die Entfernung der Schwerpunktsfaser von der obersten

$$d = 1{,}75^{cm}$$

und von der untersten

$$d' = 3{,}25^{cm}.$$

Das Trägheitsmoment ist

$$T = 18\tfrac{1}{6}.$$

Für ein Gewicht $P = 100^k$, aufgehängt am Ende eines 100^{cm} langen Stabs von jenem Querschnitt wird die grösste Spannungsintensität oben

$$J = 963^k$$

und die grösste Druckintensität unten

$$J' = 1789^k.$$

§. 256. **Relative oder Bruchfestigkeit.**

— Der Bruch durch Biegung erfolgt entweder bei c (Fig. 371) durch Zerreissen oder bei e durch Zerquetschen der Fasern, je nachdem die Spannungsintensität J oder die Druckintensität J' am ersten das Maximum $\mathfrak{A}$ oder $\mathfrak{K}$ (s. §§. 250 und 252) erreicht, wo ein Zerreissen oder Zerdrücken der Fasern eintritt. Nennt man P oder P' die Grösse der am Ende des Stabes wirkenden Kraft, bei welcher das erstere oder das letztere eintritt, so ist

$$P = \frac{\mathfrak{A}T}{ld} \text{ und } P' = \frac{\mathfrak{K}T}{ld'};$$

und bei der Gleichheit der übrigen Faktoren ist offenbar

$$P < P'$$

und der Bruch erfolgt durch Zerreissen, wenn

$$\frac{\mathfrak{A}}{d} < \frac{\mathfrak{K}}{d'}$$

oder auch

$$\frac{\mathfrak{K}}{\mathfrak{A}} > \frac{d'}{d}.$$

Ferner ist $$P' < P$$
und der Bruch erfolgt durch Zerquetschen, wenn
$$\frac{\mathfrak{R}}{d'} < \frac{\mathfrak{A}}{d},$$
also
$$\frac{\mathfrak{R}}{\mathfrak{A}} < \frac{d'}{d}$$
ist. An der Grenze, wo $P = P'$ und daher
$$\frac{\mathfrak{R}}{\mathfrak{A}} = \frac{d'}{d},$$
erfolgt der Bruch durch Zerreissen und Zerquetschen zugleich. Da nach Tab. 14 bei Schmiedeisen $\frac{\mathfrak{R}}{\mathfrak{A}} = {}^4/_5$, bei Gusseisen gleich $5^1/_2$ und bei Hölzern gleich $^1/_2$ ist, so erfolgt der Bruch

		bei Schmiedeisen	bei Gusseisen	bei Holz
a) durch Riss bei c (Fig. 371), wenn	$\frac{d'}{d} <$	$^4/_5$	$5^1/_2$	$^1/_2$
b) „ Quetschung bei e „	$\frac{d'}{d} >$	$^4/_5$	$5^1/_2$	$^1/_2$
c) „ beides zugleich „	$\frac{d'}{d} =$	$^4/_5$	$5^1/_2$	$^1/_2$.

Man wird also bei einem Stab zuerst den Schwerpunkt seines Querschnitts suchen und dessen Entfernung von der obersten und untersten Faser d und d' messen. Die vorhergehende kleine Tabelle ergibt dann, ob der Bruch durch Zerreissen oder Zerquetschen oder durch beides zugleich erfolgt. Ist z. B. $\frac{d'}{d} = 1$, wie in den Querschnitten 1—5 der Tab. 15, so erfolgt bei Schmiedeisen und Holz der Bruch durch Quetschung, bei Gusseisen durch Riss. In dem zu Ende des vorhergehenden Paragraphen gegebenen Beispiel für den Querschnitt 6 der Tab. 15 ist $\frac{d'}{d} = \frac{3,25}{1,75} = \frac{13}{7}$. Es treten folglich hier dieselben Modalitäten ein wie vorhin.

Es ist leicht einzusehen, dass derjenige Querschnitt allemal der günstigste ist, für welchen der Bruch durch Zerreissen und Zerquetschen zugleich eintritt, d. h. für welchen $\frac{d'}{d} = \frac{\mathfrak{R}}{\mathfrak{A}}$ ist. Nun ist $\frac{\mathfrak{R}}{\mathfrak{A}}$ bei Schmiedeisen nahezu $= 1$, folglich werden diejenigen Querschnitte, für welche $d' = d$ ist, bei Schmiedeisen die günstigsten sein; so also das Rechteck, der Kreis, das Kreuz oder die Doppel-T-Form (s. Nr. 1—5 in Tab. 15). Bei Hölzern

nimmt man freilich fast immer runde Stämme oder viereckige Balken; es erfolgt also hier der Bruch stets durch Zerquetschen. Für Gusseisen ist $\frac{\mathfrak{R}}{\mathfrak{A}} = 5^1/_2$; man soll also solche Querschnitte wählen, wo $\frac{d'}{d}$ wenigstens nahezu $= 5^1/_2$ ist. Die T-Formen (Nr. 6 und 8 der Tab. 15) sind bei passend gewählten Dimensionen dazu sehr geeignet.

Da aber nicht zu vergessen ist, dass die obigen Formeln nur annähernd richtig sind, wenn die Ausdehnung oder Zusammendrückung sehr weit geht, so wird man immer gut thun, durch Biegungsversuche die Werthe für $\mathfrak{A}$ und $\mathfrak{R}$ direkt zu bestimmen. Die vorletzte Columne der Tab. 14 enthält für Querschnittsformen, wo $\frac{d'}{d}$ wenigstens nahezu $= 1$ ist, solche Bruchcoëfficienten $\mathfrak{B}$, welche durch Versuche gefunden sind. Dieselben sind also in der Formel

$$P = \frac{\mathfrak{B}T}{ld}$$

anzuwenden.

Beispiel. Ein Balken von Tannenholz, 16^{cm} breit, 8^{cm} dick, wird an einem Ende eingespannt und am andern Ende, 200^{cm} von jenem entfernt, mit Gewichten belastet. Bei welcher Belastung erfolgt der Bruch, a) wenn er auf der breiten Seite liegt, b) wenn er auf der hohen Kante steht?

Für den gegebenen Querschnitt ist nach Tab. 15 im ersten Fall:

$$T = 682\tfrac{2}{3},\ d = 4$$

und im zweiten Fall

$$T = 2730\tfrac{2}{3},\ d = 8,$$

folglich ist im ersten Fall

$$P = \frac{600 \times 682\frac{2}{3}}{200 \times 4} = 512^{k}$$

und im zweiten

$$P = \frac{600 \times 2730\frac{2}{3}}{200 \times 8} = 1024^{k},$$

also gerade doppelt so gross als im ersten.

§. 257. Anstrengung. — Natürlich darf man in Wirklichkeit einen Construktionstheil einer Maschine oder eines Bauwerks nie so stark belasten, dass ein Zerreissen oder Zerdrücken oder Zerbrechen erfolgt. Die Construktionstheile dürfen sogar, besonders bei Maschinen, niemals so weit angestrengt werden, dass sie merkliche Formveränderungen erleiden. Es darf hier nicht einmal bis zur Elasticitätsgrenze gegangen werden.

Man versteht unter Anstrengung den Bruchtheil der Last, den ein solcher Theil wirklich zu tragen bekommt, von derjenigen Last, bei welcher seine Festigkeitsgrenze erreicht

wird. Bei Maschinen beträgt die Anstrengung: bei Seilen $^1/_3$; Ketten $^1/_4$; Hebel $^1/_{10}$ bis $^1/_8$; Wellen $^1/_{30}$ bis $^1/_{20}$; Rädern $^1/_{30}$ bis $^1/_{20}$. — Uebrigens kommt es natürlich ganz auf das Material, das man kennen muss, und auf den Construkteur selbst an, welche Anstrengung er demselben zumuthen zu dürfen glaubt und welche Sicherheit er verlangt.

§. 258. **Verschiedene Biegungsweisen.** — Im Vorstehenden haben wir die Biegung nur für den einfachsten Fall betrachtet. Es ist aber nicht schwer, die anderen noch vorkommenden, zusammengesetzteren daraus abzuleiten.

1) Wenn auf dem Balken AB (Fig. 372), der am einen Ende A fest eingespannt ist, eine gleichförmig vertheilte Last Q liegt, deren Grösse, mit Einschluss des Eigengewichts des Balkens, P ist, so kann für dieselbe eine Mittelkraft, im Schwerpunkt des Balkens angreifend, gesetzt werden und man erhält durch ähnliche Betrachtungen wie in §. 256, mit l die ganze Länge des Balkens bezeichnet,

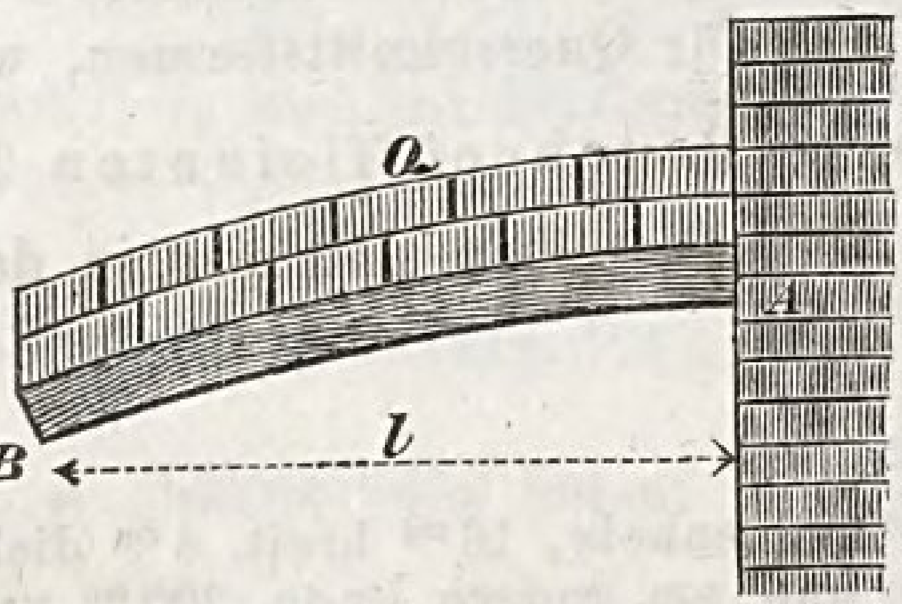


Fig. 372.

$$P \cdot \frac{l}{2} = \frac{\mathfrak{B}\,T}{d}$$

und daher
$$P = \frac{2\,\mathfrak{B}\,T}{l\,d}.$$

In diesem Falle vermag also der Balken gerade doppelt so viel zu tragen, als wenn die Last an seinem Ende aufgehängt ist.

2) Wenn der zu biegende Stab (Fig. 373) mit seinen Enden frei aufliegt und in der Mitte mit einer Last P belastet wird, so erfolgt offenbar der Bruch in der Mitte. Der Balken übt auf jeden seiner Unterstützungspunkte einen Druck gleich $\frac{P}{2}$ aus und man kann sich ihn auch so denken, als ob er in der Mitte eingeklemmt und an beiden Enden mit einer Kraft $\frac{P}{2}$ aufwärts gebogen würde. Für jede der Hälften gilt dann die Gleichung:

$$\frac{P}{2} \cdot \frac{l}{2} = \frac{\mathfrak{B}\,T}{d}$$

und daher
$$P = \frac{4\,\mathfrak{B}\,T}{l\,d}.$$

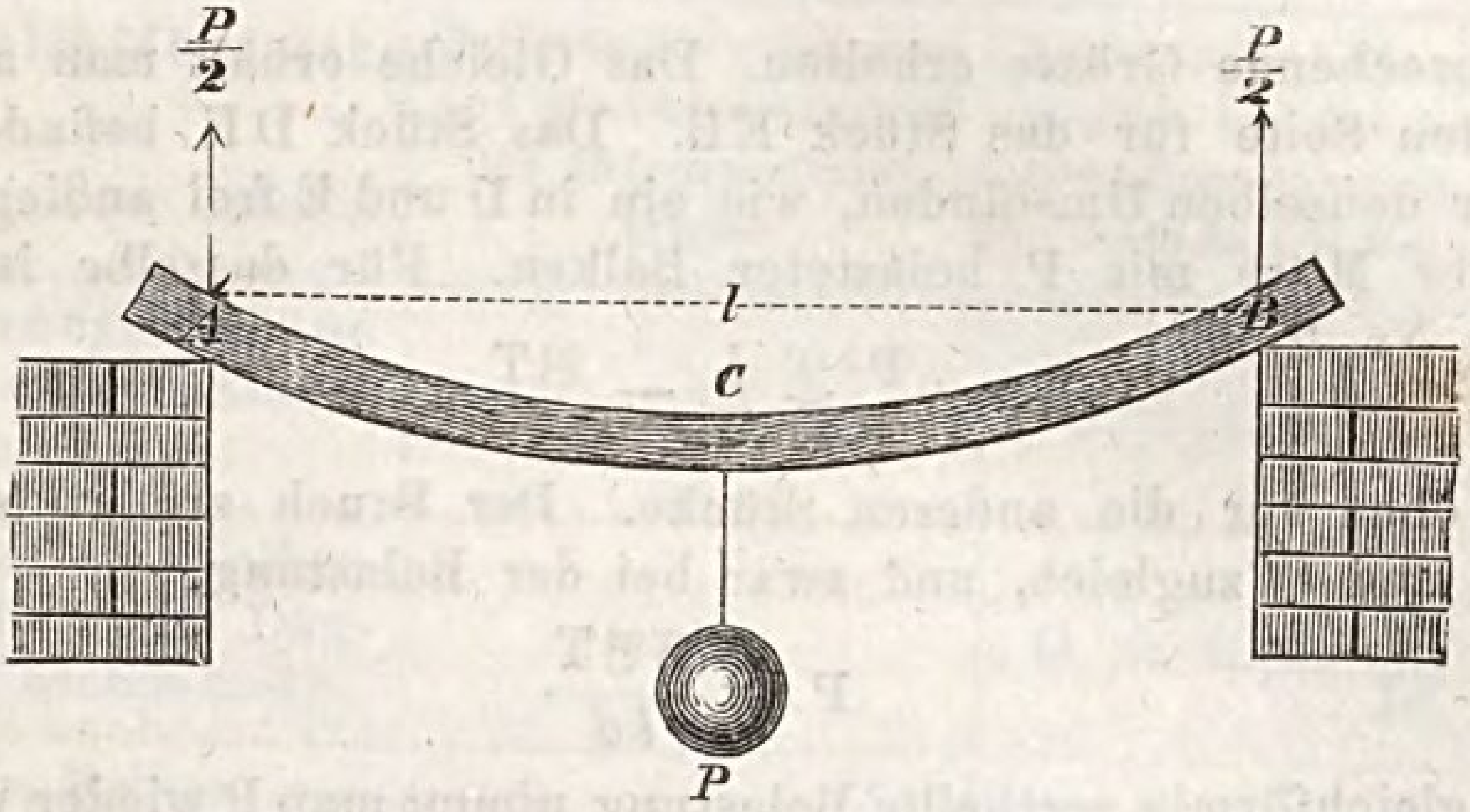


Fig. 373.

In diesem Fall ist also die Tragkraft viermal so gross, als in dem ursprünglich betrachteten. Und ist die Last P wieder gleichmässig über den Balken vertheilt, so ist sogar

$$P = \frac{8\mathfrak{B}T}{l\,d}.$$

3) Wenn der Balken an beiden Enden eingespannt, eingemauert und in der Mitte mit dem Gewichte P belastet ist (Fig. 374), so biegt er sich so, dass in den Mitten D und E seiner Hälften Wendepunkte der Biegung entstehen. Denkt man sich in jedem dieser Wendepunkte zwei gleiche und entgegengesetzte

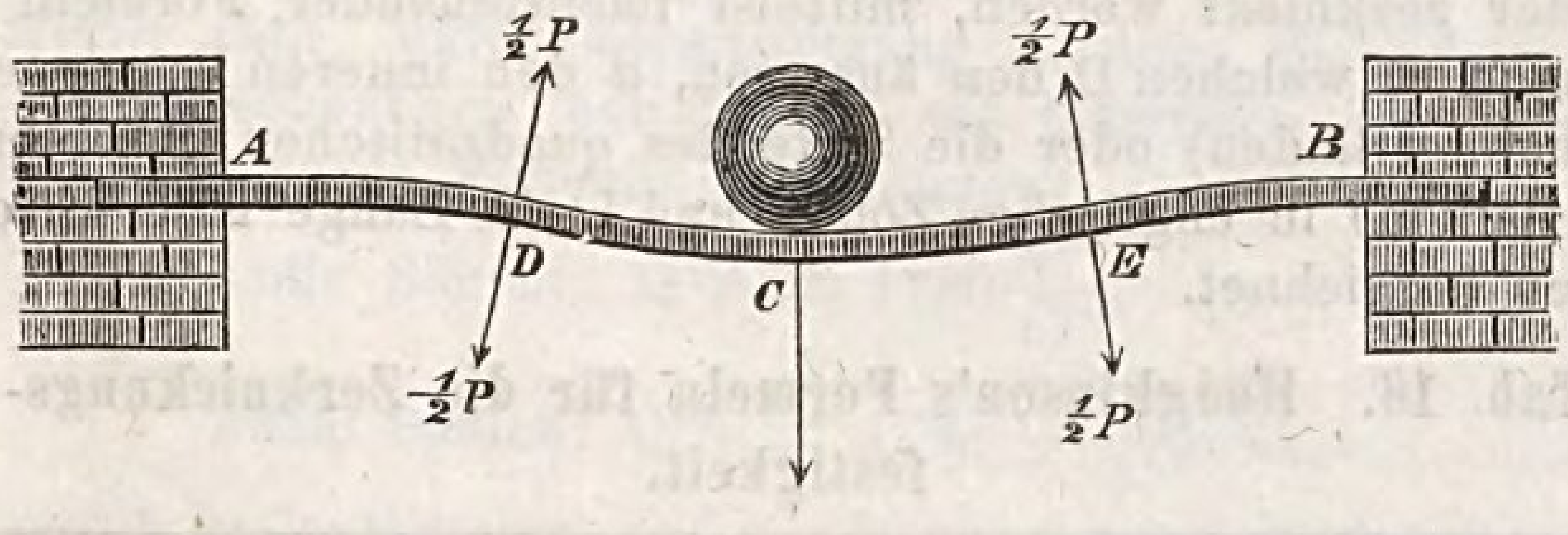


Fig. 374.

Kräfte, je von der Grösse $\frac{P}{2}$ angebracht, so wird dadurch das Gleichgewicht nicht gestört. Aber man kann sich nun den Theil A D durch die linke abwärts wirkende Kraft $\frac{P}{2}$ angegriffen denken, dann muss diese, mit $\mathfrak{B}$ den Bruchcoëfficienten bei A bezeichnet, die der Gleichung

$$\frac{P}{2} \times \frac{l}{4} = \frac{\mathfrak{B}T}{d}$$

entsprechende Grösse erhalten. Das Gleiche erhält man auf der rechten Seite für das Stück EB. Das Stück DE befindet sich unter denselben Umständen, wie ein in D und E frei aufliegender, in der Mitte mit P belasteter Balken. Für dasselbe ist also, nach Nr. 2

$$\frac{P}{2} \times \frac{l}{4} = \frac{\mathfrak{B}T}{d}$$

wie oben für die anderen Stücke. Der Bruch erfolgt also bei A, B und C zugleich, und zwar bei der Belastung

$$P = \frac{8\mathfrak{B}T}{ld}.$$

Für gleichförmig vertheilte Belastung nimmt man P wieder doppelt so gross, also

$$P = \frac{16\mathfrak{B}T}{ld}.$$

§. 259. **Zerknickungsfestigkeit.** — Wenn ein Balken, welcher beträchtlich länger als dick ist, zerdrückt wird, so geht diesem Zerdrücken ein Biegen voraus, und man sagt, er werde zerknickt. Die Vorgänge hiebei sind sehr zusammengesetzt, und man muss sich in den meisten Fällen begnügen, hier blos Erfahrungsresultate zu Grunde zu legen. Nach Versuchen von *Hodgkinson* lässt sich das Gewicht Q, in englischen Tonnen (à 2240 Pfd. engl.) ausgedrückt, durch welches Säulen und Ständer zerknickt werden, mittelst nachstehender Formeln berechnen, in welchen D den äusseren, d den inneren Durchmesser (bei hohlen Säulen) oder die Seite des quadratischen Querschnitts (bei Balken) in englischen Zollen und L die Länge in englischen Fussen bezeichnet.

Tab. 16. Hodgkinson's Formeln für die Zerknickungsfestigkeit.

Beschaffenheit der Säulen oder Balken.	Beide Enden abgerundet und die Länge übertrifft den 15 fachen Durchmesser.	Beide Enden flach, unbeweglich und festgestellt. Die Länge übertrifft den 30 fachen Durchm.
Massive cylindrische Säule aus Gusseisen.	$Q = 14{,}9 \frac{D^{3,76}}{L^{1,7}}$	$Q = 44{,}16 \frac{D^{3,55}}{L^{1,7}}$
Hohle cylindrische Säule aus Gusseisen.	$Q = 13 \frac{D^{3,76} - d^{3,76}}{L^{1,7}}$	$Q = 44{,}34 \frac{D^{3,55} - d^{3,55}}{L^{1,7}}$

Beschaffenheit der Säulen oder Balken.	Beide Enden abgerundet und die Länge übertrifft den 15 fachen Durchmesser.	Beide Enden flach, unbeweglich und festgestellt. Die Länge übertrifft den 30 fachen Durchm.
Massive cylindrische Säule aus Schmiedeeisen.	$Q = 42{,}8 \frac{D^{3,76}}{L^2}$	$Q = 133{,}75 \frac{D^{3,55}}{L^2}$
Quadratische Balken aus trockenem Danziger Eichenholze.	—	$Q = 10{,}95 \frac{D^4}{L^2}$
Quadr. Balken aus trock. Fichtenholze (Rothtanne).	—	$Q = 7{,}81 \frac{D^4}{L^2}$

Für kürzere Säulen als die Tabelle voraussetzt, wobei die Trennung theils durch Zerdrücken, theils durch Zerknicken erfolgt, gibt *Hodgkinson* zur Berechnung der Belastung Q_2 in Tonnen folgende Formel an, in welcher Q die obige Bedeutung hat, Q_1 aber das Gewicht in Tonnen bezeichnet, welches das Zerdrücken des Körpers bewirken würde, wenn er sich nicht biegen könnte:

$$Q_2 = \frac{Q\,Q_1}{Q + {}^3/_4\,Q_1}.$$

Morin räth, unter Voraussetzung 6facher Sicherheit für praktische Rechnungen bei Säulen aus Gusseisen mit ebenen Endflächen folgende Formeln zu benützen:

$$\text{volle Säulen:}\quad Q^{\text{kilg}} = 1780\,\frac{d^{3,6}}{l^{1,7}},$$

$$\text{hohle Säulen:}\quad Q^{\text{kilg}} = 1780\,\frac{D^{3,6} - d^{3,6}}{l^{1,7}},$$

wo D und d in Centimetern und l in Decimetern auszudrücken ist.

Als grösste Belastung, welche ein Stab, ohne eingebogen zu werden, zu tragen vermag, gibt *Redtenbacher:*

$$Q^{\text{kilg}} = \varepsilon\,\pi^2\,\frac{T}{l^2}$$

in der oben von uns gewählten Bezeichnungsweise, die Länge durchweg in Centimetern ausgedrückt.

§. 260. **Torsionsfestigkeit.** — Ist ein stabförmiger Körper an einem Ende festgehalten und wirkt am anderen Ende eine Kraft oder ein Drehzwilling (Fig. 375), die ihn zu verdrehen suchen,

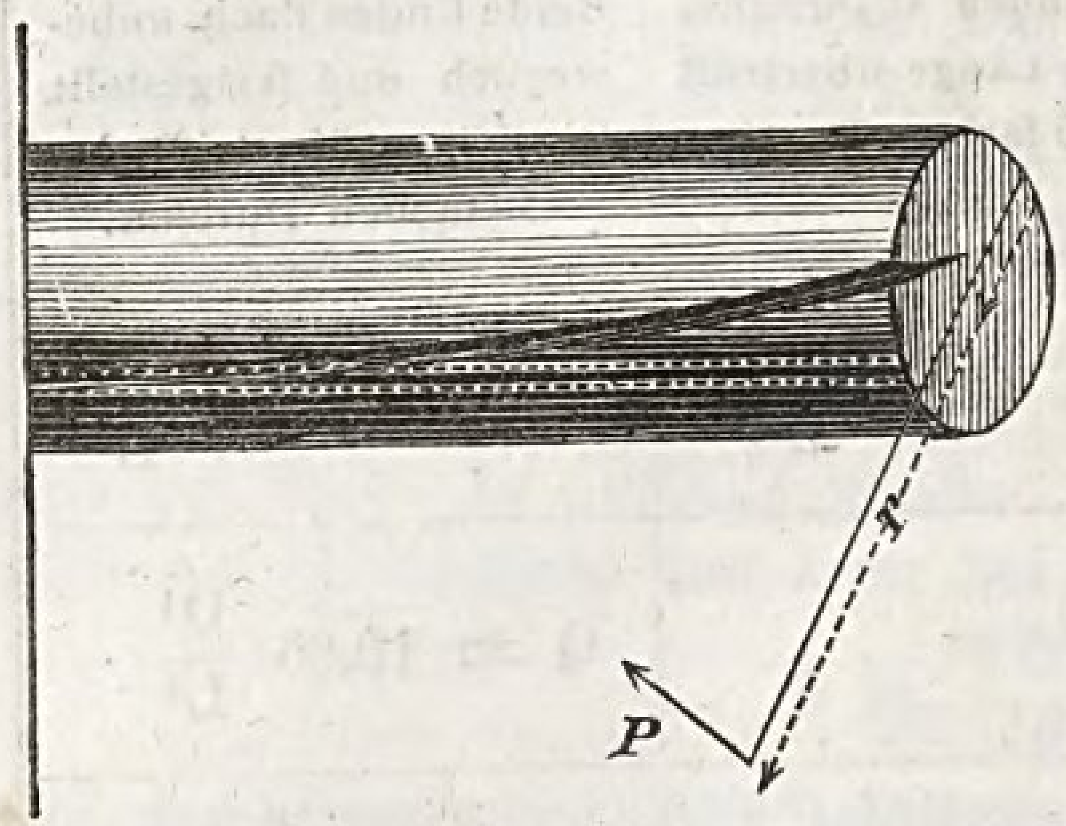


Fig. 375.

so wird er auf seine Torsionsfestigkeit in Anspruch genommen. Man kann hiebei beweisen, dass die Schwerpunktsfaser (vgl. oben §. 255) gerade bleibt und folglich die anderen um sie gedreht werden. Es stelle Fig. 376 den Querschnitt des Stabes vor, A sei die Schwerpunktsfaser und m die von dieser am weitesten, um k, entfernte Faser. In dieser bezeichne $\mathfrak{W}$ die durch das Verwinden entstehende Spannungsintensität. Dann kann man für irgend eine andere Faser n in der Entfernung $An = x$ von der Schwerpunktsfaser die auftretende Spannungsintensität dieser Entfernung proportional, also gleich

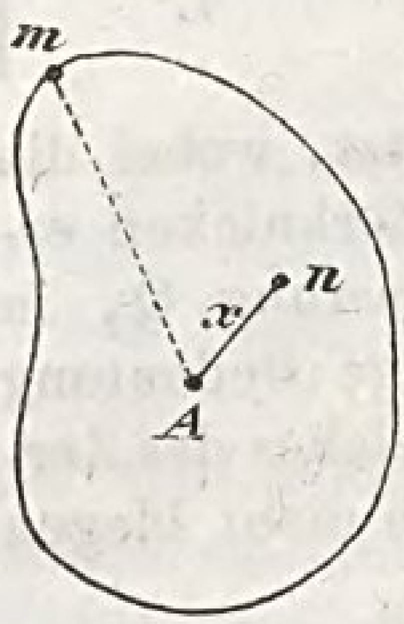


Fig. 376.

$$\mathfrak{W} \frac{x}{k}$$

setzen, sodass für den Querschnitt w dieser Faser die Spannung

$$\mathfrak{W} \frac{x}{k} w$$

wird. Das statische Moment dieser Spannung in Bezug auf eine durch den Schwerpunkt gehende, auf dem Querschnitt senkrecht stehende Achse ist:

$$\mathfrak{W} \frac{x^2}{k} w$$

und für sämmtliche Fasern bezeichne

$$\Sigma \mathfrak{W} \frac{x^2}{k} w = \frac{\mathfrak{W}}{k} \Sigma w x^2$$

die Summe aller dieser Momente. Die Summe $\Sigma w x^2$ ist offenbar das Trägheitsmoment des Querschnitts für eine, durch seinen Schwerpunkt gehende und auf ihn senkrechte Achse (nicht zu verwechseln also mit dem Trägheitsmoment des §. 255). Bezeichnen wir dasselbe mit T_1, ferner mit P die aussen wirksame Kraft und mit r ihrem Hebelarm, überhaupt mit Pr ihr statisches Moment in Bezug auf eine, mit der Schwerpunktsfaser zusammenfallende Achse, so muss

$$Pr = \frac{\mathfrak{W}}{k} T_1$$

sein.

Für den kreisförmigen Querschnitt ist $\frac{T_1}{k} = \frac{d^3\pi}{16}$,

" " quadratischen " " $\frac{T_1}{k} = \frac{b^3}{3\sqrt{2}}$,

mit d den Kreisdurchmesser und mit b die Seite des Quadrats bezeichnet. Es ist demnach

für Stäbe mit kreisrundem Querschnitt $Pr = \mathfrak{W}\frac{d^3\pi}{16}$,

" " " quadratischem " $Pr = \mathfrak{W}\frac{b^3}{3\sqrt{2}}$.

Von der Länge ist also die Torsionsfestigkeit nicht abhängig. Dagegen ist sie der dritten Potenz der Dicke proportional. Die letzte Columne der Tab. 14 (S. 530) enthält die Werthe für $\mathfrak{W}$ nach *Redtenbacher*.

Beispiel. Welche Kraft muss an einem Hebelarm von 50 cm wirken, um die Torsionsfestigkeit einer schmiedeisernen Welle zu überwinden, deren Querschnitt kreisförmig ist und 5 cm Durchmesser hat.

$$P \times 50 = 4500 \cdot \frac{5^3 . 3\frac{1}{7}}{16},$$

woraus $P = 2210^k$.

§. 261. **Festigkeit der Gefässe.** — 1) Ein cylindrisches Gefäss, dessen innerer Durchmesser D und dessen Wandstärke δ ist, werde durch eine Pressung p_0 auf jeden Quadratcentimeter, von innen nach aussen und durch eine Pressung von p_1 pro Quadratcentimeter, von aussen nach innen wirkend, angegriffen. Bezeichnet man dann wieder mit $\mathfrak{A}$ die absolute Zugfestigkeit des Materials (Tab. 14 S. 530), so ist nach *Lamé* die Wandstärke, bei welcher das Gefäss zerberstet:

$$\delta = \frac{D}{2}\left(\sqrt{\frac{\mathfrak{A} + p_0}{\mathfrak{A} + 2p_1 - p_0}} - 1\right)$$

oder angenähert: $$\delta = \frac{D}{2}\,\frac{p_0 - p_1}{\mathfrak{A} + 2p_1 - p_0}.$$

Da in diesen Formeln die Nenner der Brüche für

$$p_0 = \mathfrak{A} + 2p_1$$

Null werden, und daher δ unendlich gross wird, so ergibt sich daraus das merkwürdige Resultat, dass für einen inneren Druck von jener Grösse ein Cylinder, wie dick auch seine Wand ist, zerbersten muss. Der äussere Druck p_1 ist gewöhnlich nur der der atmosphärischen Luft, also nur klein gegen $\mathfrak{A}$. Man kann also sagen: wenn der Druck der Flüssigkeit im Innern des Gefässes auf einen Quadratcentimeter so gross wird, als die absolute Festigkeit des Materials per Quadratcentimeter, so muss der Cy-

linder bersten, wie gross auch seine Wanddicke sein mag. Es ist aber für

	Gusseisen,	Schmiedeisen,	Kanonenmetall,	Stahl
$\mathfrak{A}$:	1454	4040	2600	10000 Kilogr.

und da der Druck von 1 Atmosphäre auf einen Quadratcentimeter (vgl. §. 23) nahezu gleich 1 Kilogramm ist, so sind diese Zahlen die in Atmosphären ausgedrückten inneren Kräfte, welche cylindrische Gefässe im Maximum auszuhalten vermögen. In einem gusseisernen Cylinder kann man also Luft nicht bis zu 2000 Atmosphären verdichten, wohl aber in einem Cylinder aus den übrigen der oben genannten Metalle.

2) Kugelförmige Gefässe. Für diese ist in ganz ähnlicher Bezeichnung wie oben

$$\delta = \frac{D}{2}\,\frac{p_0 - p_1}{2\mathfrak{A} + 3p_1 - p_0}.$$

Die Wanddicke wird unendlich für

$$p_0 = 2\mathfrak{A} + 3p_1$$

d. h. ein sphärisches Gefäss platzt bei jeder Wanddicke, wenn die Spannung im Innern zweimal so gross wird als die Festigkeit des Materials, vorausgesetzt, dass der äussere Druck p_1 vernachlässigt werden kann. Dieses Ergebniss mit dem oben für cylindrische Gefässe gefundenen verglichen, sieht man, dass ein kugelförmiges Gefäss im Maximum doppelt so grossen Druck aushält als ein cylindrisches.

Wir haben bisher stillschweigend vorausgesetzt, dass die Pressung von innen nach aussen grösser ist, als die von aussen nach innen. Die für die Wanddicke gefundenen Ausdrücke gelten aber auch im umgekehrten Fall, wenn die äussere Pressung grösser ist als die innere, nur verwandelt sich dann $\mathfrak{A}$ in eine Pressung und ist negativ zu nehmen.

Bei ganz gleicher Wanddicke und gleicher Dichte eines Materials würde bei einem cylindrischen oder sphärischen Gefässe durch einen äussern Druck nicht leicht eine Zerdrückung entstehen, allein sobald die Wand an einer Stelle schwächer ist, wird sie daselbst durch den äussern Druck zuerst eingebogen, wodurch eine vollständige Verdrückung des Gefässes entstehen kann. Solche Rundgefässe haben daher gegen inneren Druck eine grössere Stabilität als gegen einen äussern.

3) Nicht cylindrische oder sphärische Gefässe werden unter der Einwirkung von pressenden Flüssigkeiten oder Gasen nicht nur ausgeweitet oder zusammengedrückt, sondern

in den meisten Fällen in der Weise deformirt, dass Gestalten entstehen, die den ursprünglichen nicht mehr geometrisch ähnlich sind. Dies ist z. B. der Fall bei Gefässen mit flachen Wänden. Die Festigkeitstheorie dieser Gefässe erfordert sehr weitläufige und schwierige Rechnungen. Für starke Pressungen sind überhaupt solche nicht cylindrische oder kugelförmige Gefässe möglichst zu vermeiden.

Zweite Abtheilung.

Mechanik der flüssigen und luftförmigen Körper.

§. 262. In der ersten Abtheilung dieses Werkes wurden die allgemeinen Principien der Mechanik, die für alle Arten von Körper Geltung haben, aufgestellt; zugleich wurde ihre Anwendung auf feste Körper, auf Maschinen im Allgemeinen wie im Besonderen näher betrachtet. Wenn man nun die flüssigen und luftförmigen Körper in's Auge fasst, so erkennt man leicht, dass für diese, zufolge ihrer eigenthümlichen Constitution, besondere Gesetze existiren müssen. Die Aufstellung dieser Gesetze ist der Zweck dieser zweiten Abtheilung; zugleich soll dieselbe ihre Anwendung auf die Betrachtung derjenigen Maschinen und der verschiedenen mechanischen Erscheinungen, bei denen die flüssigen und luftförmigen Körper eine wichtige Rolle spielen, enthalten.

I. Gesetze des Gleichgewichts flüssiger und luftförmiger Körper.

§. 263. **Fortpflanzung des Druckes in flüssigen Körpern.** — Alle Körper, welche sich um uns her auf der Erde befinden, sind schwer, d. h. sie sind der Wirkung der Schwerkraft unterworfen. Aber diese Eigenschaft hängt nicht unzertrennlich mit der Natur der Körper zusammen; sie entspringt lediglich aus der Anziehung, welche sie von Seite der Erde erfahren, in deren Nähe sie sich befinden. Wenn wir einen Körper an einen Ort des Raums versetzen könnten, wo er sehr weit von

der Erde sowohl, als von allen Himmelskörpern entfernt wäre, die eine ähnliche Anziehung wie die Erde auf ihn ausüben könnten, so würden wir ihn nicht mehr schwer finden. Wir dürfen also von einem Körper voraussetzen, dass er nicht schwer sei, ohne dadurch im Mindesten seine Natur zu beeinträchtigen, und diese Voraussetzung ist es auch, unter der wir zunächst die flüssigen Körper, mit denen wir uns beschäftigen werden, betrachten. Es wird uns dadurch leichter werden, die Fortpflanzung des Drucks in denselben klar verständlich zu machen.

Es sei A B (Fig. 377) eine Röhre von irgend einer Gestalt, aber von durchweg gleichem Querschnitt. In dieser Röhre denken wir uns eine Flüssigkeit, Wasser z. B., enthalten, von der wir voraussetzen, dass die Schwere nicht auf sie einwirke; an den beiden Enden A und B sei die Röhre mit Kolben verschlossen, welche genau an die inneren Wände derselben anschliessen. Wenn man den Kolben A in das Innere der Röhre hinein drückt, so übt derselbe einen Druck gegen die Flüssigkeit aus, und diese sucht ihrerseits wieder den Kolben B von innen nach aussen zu drücken. Um daher den Kolben B in seiner ursprünglichen Lage zu erhalten, muss man eine widerstehende Kraft an ihm anbringen, welche sich der Wirkung der an dem Kolben A angebrachten Kraft widersetzt. Man wird leicht einsehen, dass im Falle des Gleichgewichts diese an dem Kolben B wirkende widerstehende Kraft ebenso gross sein muss als die Kraft, mit welcher der Kolben A einwärts gedrückt wird.

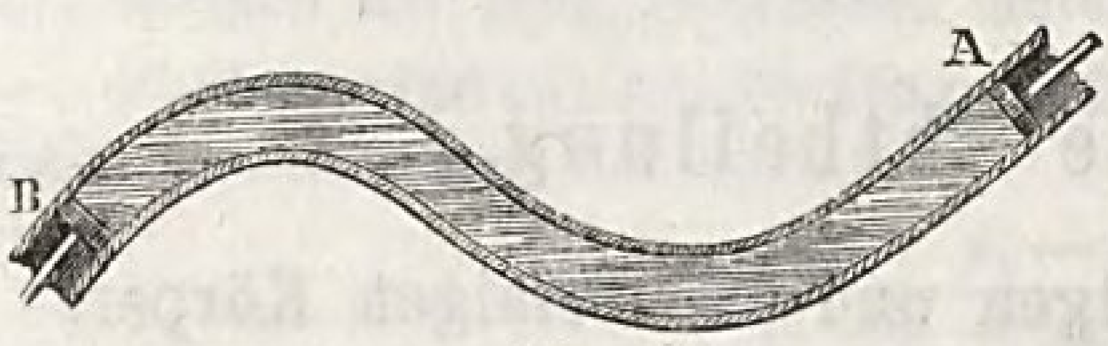


Fig. 377.

§. 264. Nehmen wir nun ein auf allen Seiten geschlossenes Gefäss von irgend einer Form, das mit einer Flüssigkeit, die wir wieder als schwerlos voraussetzen, vollständig gefüllt ist (Fig. 378). In den Wänden dieses Gefässes seien zwei Oeffnungen A und B von genau gleichen Dimensionen angebracht; diese Oeffnungen seien mit kurzen Röhrenstücken versehen, in welchen sich zwei Kolben bewegen lassen, deren nach innen gekehrte Flächen mit der Flüssigkeit in Berührung stehen und auf diese Weise die Wandstücke ersetzen, die hier herausgenommen worden sind. Wenn man auf den Kolben A einen

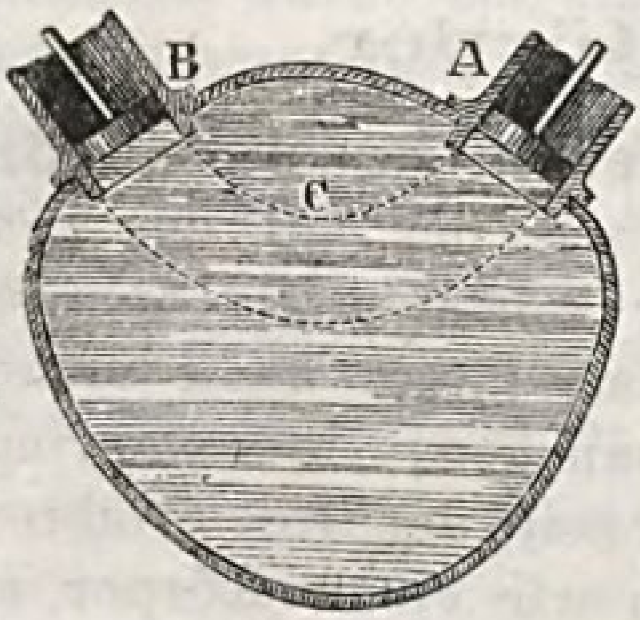


Fig. 378.

Druck ausübt, der ihn in das Innere der Flüssigkeit zu treiben sucht, so sucht diese letztere bei der Oeffnung B auszutreten, indem sie einen Druck auf den Kolben ausübt, welcher diese Oeffnung verschliesst. Um das Ausfliessen der Flüssigkeit zu verhindern und den Kolben B an der Stelle zu halten, welche ihm ursprünglich gegeben worden ist, muss man eine widerstehende Kraft an demselben anbringen, die im Stande ist, der Kraft das Gleichgewicht zu halten, mit welcher der Kolben A einwärts getrieben wird. Wir können nun leicht nachweisen, dass diese an dem Kolben B anzubringende Kraft ebenso wie in dem vorhergehenden Falle gleich sein muss derjenigen, welche an dem Kolben A angreift. In der That kann man die Röhrenstücke, welche an den Oeffnungen A und B angebracht sind, als die Enden einer in Gedanken durch das Innere der Flüssigkeit gelegten Röhre ACB betrachten, deren Querschnitte durchweg dieselbe Grösse haben. Wenn an dem Kolben B ein Widerstand wirkt, der gross genug ist, um dem Druck, welcher auf den Kolben A ausgeübt wird, das Gleichgewicht zu halten, so kann offenbar, ohne dass dieses Gleichgewicht gestört wird, vorausgesetzt werden, dass die Flüssigkeit rings um die ideale Röhre ACB die leichte Beweglichkeit ihrer Theilchen verliert, d. h. zu einem festen Körper erstarrt. Dadurch bleibt nur noch diejenige Flüssigkeit als solche übrig, welche im Innern der Röhre ACB, deren Wände von der erstarrten Flüssigkeit gebildet werden, enthalten ist; die beiden Kolben befinden sich also ganz unter denselben Umständen als diejenigen des §. 263 und es müssen folglich die an ihnen angebrachten Kräfte gleich gross sein.

§. **265.** Setzen wir nun voraus, dass in der Wand desselben Gefässes, von welchem wir eben gesprochen haben und das wiederum mit einer als schwerlos gedachten Flüssigkeit gefüllt ist, drei gleiche Oeffnungen A, B, C (Fig. 379) angebracht seien; die beiden Oeffnungen A und B, welche die Form eines Quadrates haben mögen, seien so neben einander gelegen, dass sie eine Seite gemeinschaftlich haben. Wenn man diese Oeffnungen durch drei Kolben verschliesst, und man bringt an jedem von diesen letzteren eine Kraft an, die ihn in's Innere des Gefässes zu treiben sucht, so müssen diese drei Kräfte gleich gross sein, um sich gegenseitig das Gleichgewicht zu halten. Denn vorausgesetzt, dieses Gleichge-

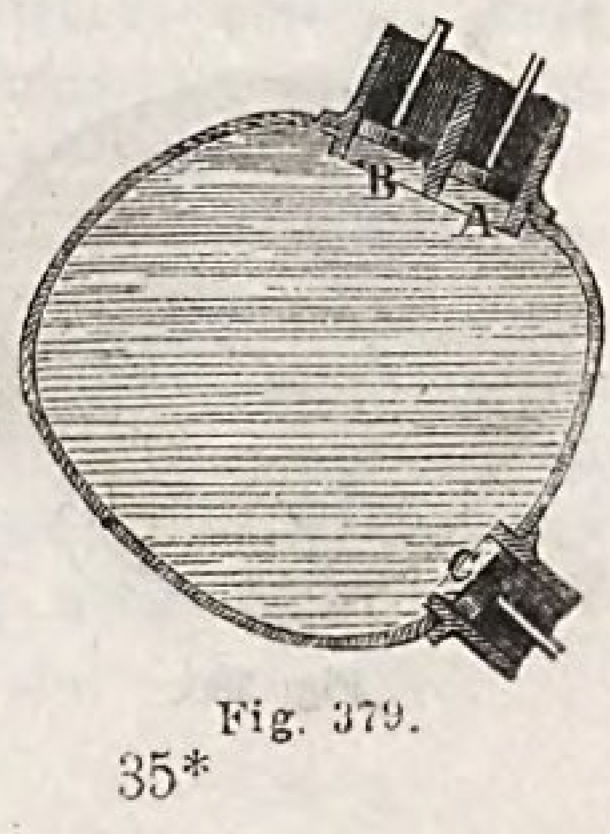


Fig. 379.

wicht sei vorhanden, so wird es offenbar nicht gestört, wenn man sich einen von den drei Kolben als absolut fest denkt, sodass er nichts als einen Theil der Gefässwand bildet; dadurch führt man aber den in Rede stehenden Fall auf den zurück, wo die Gefässwand nur zwei gleiche Oeffnungen besitzt und für welchen im vorigen Paragraphen die Gleichheit der beiden Kräfte, die an den Kolben wirken, nachgewiesen wurde.

Aber die beiden zusammenstossenden Kolben A und B, welche wir bisher als getrennt und unabhängig von einander gedacht haben, können offenbar auch an einander befestigt werden, ohne dass das Gleichgewicht dadurch gestört wird, vorausgesetzt, dass sie noch denselben Kräften unterworfen bleiben. Man erhält so einen einzigen Kolben AB, dessen mit der Flüssigkeit in Berührung stehende Oberfläche doppelt so gross als die des Kolbens C ist. Die beiden gleichen und parallelen Kräfte, die an den beiden Kolben A und B thätig waren, greifen nun beide an dem einzigen Kolben AB an und können durch eine einzige Kraft ersetzt werden, welche dieselbe Richtung hat und doppelt so gross als jede von ihnen ist. Wenn folglich in der Wand des Gefässes zwei Oeffnungen AB, C angebracht sind, von denen die eine doppelt so gross als die andere ist, so muss für den Fall des Gleichgewichts die Kraft, welche an dem Kolben angebracht wird, der die erste Oeffnung verschliesst, doppelt so gross als diejenige sein, welche an dem Kolben an der zweiten Oeffnung angreift.

Wenn wir uns nun ein von allen Seiten geschlossenes Gefäss denken, welches eine schwerlose Flüssigkeit enthält und dessen Wände von zwei Oeffnungen durchdrungen werden, von denen die eine drei-, vier-, fünfmal so gross als die andere ist, so ist auf dieselbe Art wie oben leicht einzusehen, dass in dem Falle, wo diese Oeffnungen durch Kolben verschlossen werden, auf welche Kräfte einwirken, Gleichgewicht nur dann stattfinden kann, wenn die an dem ersten Kolben wirkende Kraft drei-, vier-, fünfmal so gross als die andere ist. Im Allgemeinen kann man aus Obigem schliessen, dass die Kräfte, welche an den Kolben A und B (Fig. 380) angreifen, die zwei Oeffnungen in der Wand eines von allen Seiten geschlossenen und mit einer schwerlosen Flüssigkeit gefüllten Gefässes verschliessen, der Grösse dieser Oeffnungen proportional sein müssen, wenn sie sich das Gleichgewicht halten sollen.

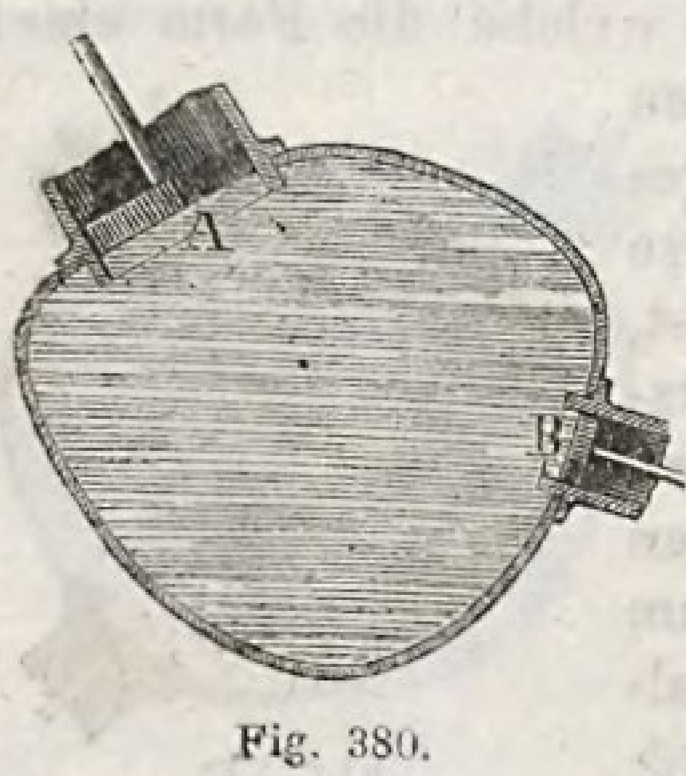


Fig. 380.

§. 266. Wenn an dem Kolben A (Fig. 380) eine Kraft so angebracht ist, dass sie ihn in die Flüssigkeit hinein zu drücken sucht, so übt der Kolben einen Druck gegen die Flüssigkeit aus; diese drückt ihrerseits wieder auf den Kolben B und sucht denselben nach auswärts zu schieben. Um diesem Druck, welchen der Kolben B seitens der Flüssigkeit erfährt, das Gleichgewicht zu halten, muss eine widerstehende Kraft an ihm angebracht werden, deren Grösse im Verhältniss zu der, welche an dem Kolben A wirkt, wir soeben festgestellt haben. Wenn der Kolben B an der Wand des Gefässes befestigt wäre, sodass er nur einen Theil dieser Wand ausmachen würde, so wäre man nicht mehr genöthigt, ihn durch eine Kraft im Gleichgewicht zu halten; aber er würde desshalb nicht minder einen Druck von Seite der Flüssigkeit erfahren, der, wie bisher senkrecht auf die Kolbenfläche, nun senkrecht auf das Wandstück ausgeübt wird; und weil sich der so befestigte Kolben B unter denselben Umständen befindet wie die anderen Theile der Wand des Gefässes, so kann man sagen, dass die an dem Kolben A wirkende Kraft Drückungen der Flüssigkeit gegen alle Theile dieser Wand in senkrechter Richtung gegen dieselben hervorruft; und aus dem Vorhergehenden geht hervor, dass jede dieser Drückungen sich zu der an dem Kolben A wirkenden Kraft verhält wie die Grösse der Wandfläche, auf welche sie ausgeübt wird, zur Grösse der Oeffnung A; die Drückungen auf verschiedene Wandstücke sind also der Grösse dieser Wandstücke proportional. Dieser eben ausgesprochene Satz enthält das Gesetz von der gleichmässigen Fortpflanzung des Druckes in einer Flüssigkeit.

Setzen wir z. B. voraus, dass der Kolben A eine Fläche von 10 Quadratcentimeter habe, und dass die Kraft, welche an ihm angebracht ist, 50 Kilogramme betrage. In Folge der Wirkung dieser Kraft übt die Flüssigkeit nach allen Seiten hin einen Druck auf die Wand des Gefässes aus; der Druck, welchen diese Wand auf einer Fläche von einem Quadratcentimeter zu ertragen hat, ist nach dem obigen Satz 5 Kilogramm, auf einer Fläche von 2 Quadratcentimeter 10, auf einer Fläche von 3 Quadratcentimeter 15 Kilogramm u. s. f. Man sagt in diesem Fall, dass der Druck, welchen die Flüssigkeit auf die Wand ausübt, 5 Kilogramm auf den Quadratcentimeter beträgt, und dieser Druck von 5 Kilogramm ist es, welchen man den auf die Flächeneinheit bezogenen Druck, oder kurz den Druck auf die Flächeneinheit nennt.

§. 267. **Druck in den verschiedenen Punkten innerhalb einer Flüssigkeitsmasse. — Gleichheit dieses Druckes nach allen Richtungen hin.** — Denken wir uns irgend einen Punkt A (Fig. 381) im Innern einer schwerlosen Flüssigkeitsmasse, die in einem von allen Seiten geschlossenen Gefäss enthalten ist; denken wir uns ferner durch diesen Punkt A eine kleine Ebene *mn* in irgend einer Richtung hindurch gelegt: Wenn die Flüssigkeit auf die verschiedenen Theile der Wand des Gefässes einen Druck ausübt, den wir uns z. B. durch Einwirkung einer Kraft auf den Kolben B hervorgebracht denken können, so erfährt die kleine Ebene *mn* gleichfalls einen Druck auf ihren beiden Seiten, wie wir sogleich nachweisen können.

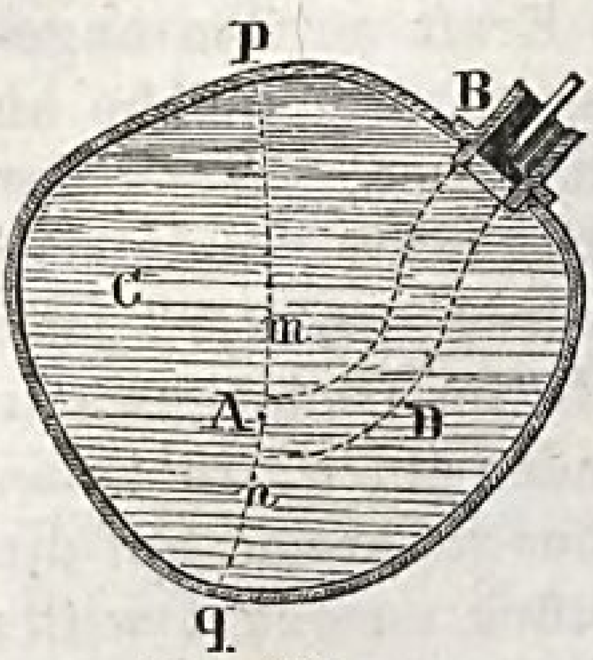


Fig. 381.

Denken wir uns zu diesem Behufe mit der kleinen Ebene *mn* eine Fläche *pq* von willkürlicher Form verbunden, welche sich nach allen Seiten hin bis zur Wand des Gefässes erstreckt und auf diese Weise die Flüssigkeit in zwei vollkommen getrennte Theile C, D scheidet. Das Gleichgewicht der Flüssigkeit wird offenbar nicht gestört, wenn wir voraussetzen, dass der eine Theil derselben, C z. B., erstarre, und es ist zugleich klar, dass diese Annahme in keiner Weise die Umstände ändert, unter welchen sich die Seite der Ebene *mn* befindet, welche nach dem andern Theile D zugekehrt ist. Aber diese Ebene gehört alsdann der Wand an, welche die noch übrig bleibende Flüssigkeit umschliesst, und sie erfährt folglich denselben Druck wie alle Theile dieser Wand, welche dieselbe Grösse wie sie haben.

Es bringt also eine Kraft, welche an dem Kolben B wirkt, nicht allein einen Druck der Flüssigkeit auf jeden Theil der Wand des Gefässes hervor, welches sie enthält, sondern auch auf jede Seite irgend einer Ebene, welche man sich durch einen beliebigen Punkt im Innern der Flüssigkeitsmasse gelegt denkt; und alle diese Drückungen sind für eine und dieselbe Grösse der gedrückten Fläche gleich gross. Dabei ist wohl hervorzuheben, dass die Drückungen, welche die beiden Seiten der Ebene zu erleiden haben, senkrecht auf diese Ebene gerichtet sind.

Wenn man sich nun durch denselben Punkt A nach und nach verschiedene solche Ebenen wie die *mn* (Fig. 381) gelegt denkt, so erfahren alle diese Ebenen denselben Druck auf die Flächeneinheit, weil nach dem, was wir bisher gesagt haben,

dieser Druck in keiner Weise von der Richtung der Ebene abhängt. Somit ist der Satz von der Gleichheit des Druckes nach allen Richtungen rings um einen Punkt im Innern einer Flüssigkeitsmasse erwiesen. Man nennt den Druck auf die Flächeneinheit irgend einer der Ebenen, welche durch den Punkt A hindurch gehen, „den Druck in dem Punkte A." Nach dem Gesetz der gleichmässigen Fortpflanzung des Druckes ist dieser Druck überall, wo auch der Punkt A in der Flüssigkeit genommen wird, von derselben Grösse; dies gilt auch noch, wenn der Punkt in der Wand des Gefässes selbst gelegen ist, und hat man sich dann den Druck auf denselben stets senkrecht zu der Stelle der Wand vorzustellen, wo der Punkt genommen wurde.

§. 268. **Drückungen in schweren Flüssigkeiten.** — Die vorhergehenden Resultate wurden unter der Voraussetzung erhalten, dass die Flüssigkeit, um welche es sich handelte, der Wirkung der Schwerkraft nicht unterworfen ist. Kehren wir nun in die Wirklichkeit zurück und sehen wir, wie diese Resultate modificirt werden, wenn wir von der Wirkung der Schwerkraft nicht mehr abstrahiren.

Wenn in einem von allen Seiten geschlossenen Gefäss eine schwere Flüssigkeit enthalten ist, so übt dieselbe auf jeden Fall auf die verschiedenen Theile der Wand dieses Gefässes Drückungen aus, sei es nun, dass diese Drückungen lediglich von dem Gewichte der Flüssigkeit herrühren, oder sei es auch, dass ausserdem noch durch eine Kraft, die in ähnlicher Weise, wie wir es bisher angenommen haben, auf einen Kolben wirkt, Drückungen hervorgebracht werden, die sich mit den vorigen vereinigen. Aber diese Drückungen, welche in den verschiedenen Punkten der Wand auf gleich grosse Flächen ausgeübt werden, haben nun nicht mehr überall dieselbe Grösse; sie verändern sich, wie wir sogleich sehen werden, in Folge der Wirkung der Schwere von einem Punkt zum andern. Nichtsdestoweniger erkennt man leicht, dass die Drückungen, welche gleich grosse Flächenstücke der verschiedenen Ebenen zu erleiden haben, die sämmtlich durch einen und denselben Punkt A (Fig. 382) im Innern der Flüssigkeitsmasse gelegt werden, einander gleich sind, vorausgesetzt, dass man jene Flächenstücke um den Punkt A nur sehr klein nimmt. Von der Richtigkeit dieser Behauptung überzeugt man sich auf folgende Weise:

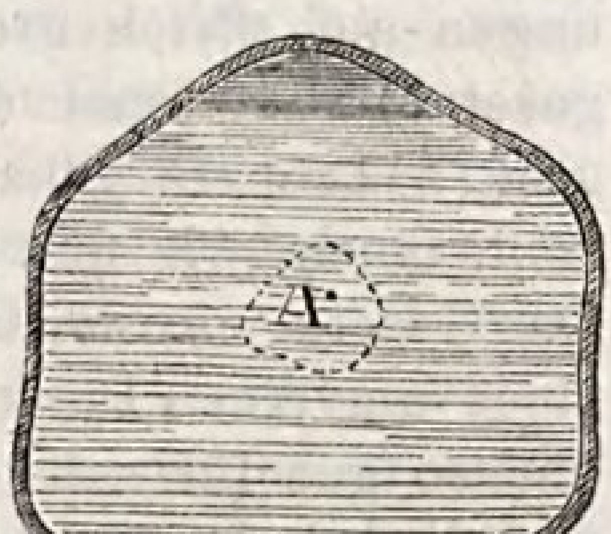


Fig. 382.

Wenn man sich rings um den Punkt A (Fig. 382) eine vollständig geschlossene Oberfläche von kleinen Dimensionen denkt, welche jenen Punkt in ihrem Innern enthält, so kann man offenbar annehmen, dass die gesammte Flüssigkeit ausserhalb dieser Fläche erstarre, ohne dass dadurch das Gleichgewicht gestört wird, und ohne dass die Umstände, unter denen sich die Flüssigkeit in nächster Nachbarschaft des Punktes A befindet, verändert werden. Aber alsdann behält man im Innern der Oberfläche nur noch eine sehr geringe Menge von Flüssigkeit übrig, welche gegen jene Oberfläche in ihren verschiedenen Punkten gewisse Drückungen ausübt. Diese Drückungen sind streng genommen noch ungleich, weil die Flüssigkeit, durch welche sie hervorgebracht werden, schwer ist; aber da das ganze Gewicht der Flüssigkeit nur ein sehr geringes ist, so ist begreiflich, dass die Wirkung dieses Gewichtes nur unerhebliche Unterschiede in den Drückungen hervorbringen kann, welche die Flüssigkeit in den verschiedenen Punkten auf ihre Umhüllung ausübt. Diese Unterschiede werden um so kleiner werden, je kleinere Dimensionen man der geschlossenen Oberfläche gibt, welche man sich rings um den Punkt A gelegt denkt. Wenn man also voraussetzt, dass sich die Dimensionen jener kleinen geschlossenen Fläche unendlich vermindern, so werden sich die Drückungen, welche sie in ihren verschiedenen Punkten von Seite der Flüssigkeit zu erleiden hat, mehr und mehr der Gleichheit nähern, d. h. diese Drückungen werden sich mehr und mehr denjenigen nähern, welche stattfinden würden, wenn die in der nächsten Nachbarschaft des Punktes A gelegene Flüssigkeit nicht schwer wäre. Wenn wir also nur die Oberfläche, von welcher wir sprechen, von hinlänglich kleinen Dimensionen nehmen, so können wir immer die Flüssigkeit, welche sie enthält, so betrachten, als wenn sie der Wirkung der Schwerkraft nicht unterworfen wäre. Daraus folgt aber, dass die verschiedenen Ebenen, die man sich durch den Punkt A gelegt denken kann, gleich grosse Drückungen auf gleich grosse Flächenstücke zu erleiden haben, vorausgesetzt, dass man diesen Ebenen nur sehr kleine Dimensionen gibt, sodass sie ganz im Innern der kleinen Oberfläche enthalten sind, deren wir uns zur Erlangung dieses Resultats bedient haben. Das Gesetz von der Gleichheit des Druckes nach allen Richtungen rings um einen Punkt im Innern einer Flüssigkeitsmasse gilt also ebenso gut für schwere Flüssigkeiten als für schwerlose.

Wir haben soeben gesagt, dass die Gleichheit des Druckes, welcher auf die verschiedenen Ebenen, die man sich durch einen

Punkt A einer schweren Flüssigkeitsmasse gelegt denken kann, ausgeübt wird, nur so lange stattfindet, als auf diesen Ebenen nur sehr kleine Flächenstücke rings um den Punkt A genommen werden. Im Allgemeinen werden diese Drückungen, wenn sie auf die Flächeneinheit jeder dieser Ebenen bezogen würden, nicht gleich gross unter sich sein, wenigstens so lange nicht, als diese Flächeneinheit nicht ausserordentlich klein genommen wird. Um zu dem Begriff zu gelangen, den man mit dem Ausdruck: „Druck im Punkte A einer Flüssigkeitsmasse" verbindet, denkt man sich, dass die Flächeneinheit auf jeder der Ebenen, welche man sich durch diesen Punkt gelegt denken kann, in ihrer ganzen Ausdehnung gleichförmig gedrückt wird, und zwar mit derselben Stärke wie in der nächsten Nachbarschaft des Punktes A. Der Gesammtdruck, welchen auf diese Weise die Flächeneinheit zu tragen hat, hat dann für alle Ebenen durch den Punkt A dieselbe Grösse, und dieser Gesammtdruck ist es, welchen man den „Druck im Punkte A" nennt.

§. **269.** Sehen wir nun, in welcher Weise sich der Druck von einem Punkt zum andern in einer schweren Flüssigkeitsmasse, die sich im Gleichgewicht befindet und von der wir voraussetzen, dass sie durchweg gleichartig sei, verändert.

Nehmen wir zunächst zwei Punkte A, B (Fig. 383), welche in derselben Horizontalebene gelegen sind. Wir können uns vorstellen, dass rings um diese beiden Punkte, wie um zwei Mittelpunkte, zwei kleine, gleichgrosse Kreise beschrieben werden, deren Ebenen senkrecht auf der Linie AB stehen, welche die beiden Punkte mit einander verbindet; ferner können wir uns denken, dass diese beiden kleinen Kreise die Grundflächen eines Cylinders bilden, dessen Achse die Linie AB ist, und dass die gesammte Flüssigkeit, die sich ausserhalb dieses Cylinders befindet, zu einem festen Körper erstarre. Dann haben wir blos noch die Flüssigkeit, welche im Innern des Cylinders enthalten ist, zu betrachten. Nun ist wohl klar, dass die Drückungen, welche diese Flüssigkeit auf die beiden Grundflächen A und B des Cylinders ausübt, unter sich gleich sind, ganz ebenso, als wenn diese Flüssigkeit nicht schwer wäre. Denn die Kräfte, welche aus der Wirkung der Schwere auf die verschiedenen Moleküle der Flüssigkeit hervorgehen, sind sämmtlich vertikal und suchen daher dieselbe weder bei der einen, noch bei der andern Grund-

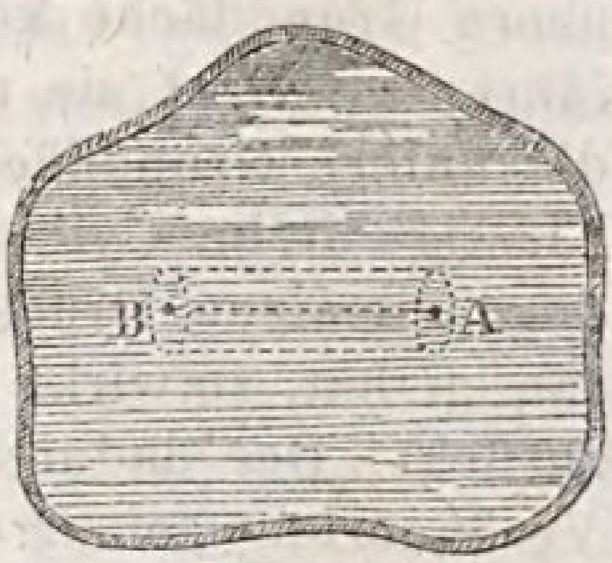


Fig. 383.

fläche des Cylinders ausfliessen zu machen. Die Gleichheit der Drückungen, welche von der Flüssigkeit auf die beiden kleinen Kreise ausgeübt werden, welche wir uns um die beiden Punkte A und B beschrieben denken, fand aber offenbar auch schon statt, bevor die Flüssigkeit ausserhalb des Cylinders erstarrt war, und daraus folgt, dass die Drückungen in den Punkten A und B unter sich gleich sind. Man sieht daraus, dass in einer schweren, im Gleichgewicht befindlichen, gleichartigen Flüssigkeitsmasse der Druck in allen Punkten, welche in derselben Horizontalebene gelegen sind, gleich gross ist.

§. 270. Betrachten wir nun zwei Punkte A und B (Fig. 384), welche in derselben Vertikalen gelegen sind. Wir denken uns wieder um diese zwei Punkte, wie um Mittelpunkte, zwei kleine, gleich grosse Kreise gezogen, deren Ebenen horizontal liegen; ebenso betrachten wir diese beiden Kreise als Grundflächen eines Cylinders, dessen Achse die Linie AB ist, und setzen voraus, dass die ganze Flüssigkeit ausserhalb dieses Cylinders erstarre. Unter diesen Umständen sieht man nun leicht, dass die Flüssigkeit im Innern des Cylinders ungleiche Drückungen auf die beiden Grundflächen desselben ausüben muss. Wenn die obere Grundfläche keinen Druck von Seite dieser Flüssigkeit erfährt, so wirkt sie auch nicht wieder auf dieselbe zurück, und die untere Grundfläche hat offenbar lediglich das Gewicht der Flüssigkeit im Cylinder zu tragen. Wenn die obere Grundfläche dagegen einen Druck von Seite der Flüssigkeit im Cylinder zu tragen hat, so wirkt sie mit gleicher Stärke auf diese Flüssigkeit zurück. Der dadurch hervorgebrachte Druck pflanzt sich, ohne Veränderung seiner Grösse, auf die untere Grundfläche des Cylinders fort, und diese hat daher diesen Druck und ausserdem noch das Gewicht der in dem Cylinder enthaltenen Flüssigkeit zu tragen. Es ist also in jedem Falle der Druck, welchen die untere Grundfläche des Cylinders zu tragen hat, grösser als der Druck, welcher auf die obere Grundfläche ausgeübt wird, und zwar grösser um das Gewicht der im Cylinder enthaltenen Flüssigkeit.

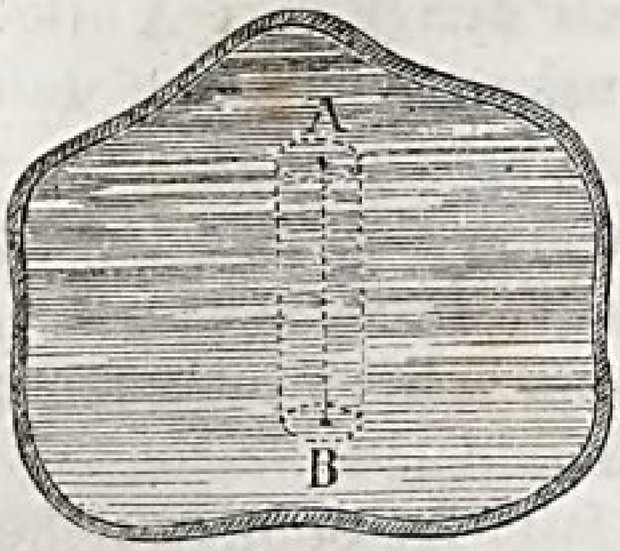


Fig. 384.

Dasselbe, was stattfindet, wenn man sich die ausserhalb des Cylinders gelegene Flüssigkeitsmasse erstarrt denkt, gilt offenbar auch noch, bevor diese Erstarrung eingetreten ist. In einer schweren gleichartigen Flüssigkeit also ist die Differenz zwischen

den Drückungen, welche zwei gleich grosse, horizontale Flächen zu erleiden haben, welche durch zwei, in denselben Vertikalen gelegenen Punkte hindurch gelegt werden, gleich dem Gewichte der Flüssigkeit, welche ein Cylinder enthält, der zur Basis eine jener beiden Flächen und zur Höhe den Abstand der beiden Punkte hat, durch welche sie gelegt sind. Und wenn man beachtet, dass das, was man den Druck in einem Punkt einer Flüssigkeit nennt, der Druck ist, welcher auf die Flächeneinheit bezogen wird (§§. 267 und 268), so kann man den folgenden Satz aussprechen: Der Druck in einem Punkte einer schweren, gleichartigen Flüssigkeitsmasse ist gleich dem Druck in einem andern, vertikal darüber gelegenen Punkt, vermehrt um das Gewicht der Flüssigkeit, welche ein Cylinder enthält, der zur Basis die Flächeneinheit und zur Höhe die Entfernung der beiden Punkte hat.

§. **271.** Seien endlich A und B (Fig. 385) zwei Punkte einer schweren, gleichartigen Flüssigkeitsmasse, welche weder in einer und derselben vertikalen Linie, noch auf derselben horizontalen Ebene gelegen sind. Um die Drückungen, welche in diesen beiden Punkten stattfinden, zu vergleichen, denken wir uns einen dritten Punkt C dazu, der im Durchschnitt der durch den Punkt A geführten Vertikalen mit der Horizontalebene, die durch den Punkt B gelegt werden kann, liegt. Die Drückungen in den Punkten B und C sind gleich gross (§. 269). Aber der Druck in C ist grösser als der Druck in A, und zwar grösser um das Gewicht der Flüssigkeit, welche ein Cylinder enthält, der zur Basis die Flächeneinheit und zur Höhe die Linie A C, d. h. den vertikalen Abstand oder den Niveau-Unterschied der beiden Punkte A und B hat. Man hat also folgenden Satz: Der Druck in einem Punkt einer schweren, gleichartigen Flüssigkeit ist gleich dem Druck in einem andern höher gelegenen Punkt, vermehrt um das Gewicht der Flüssigkeitsmenge, welche ein Cylinder enthält, welcher zur Basis die Flächeneinheit und zur Höhe den vertikalen Abstand oder Niveau-Unterschied dieser beiden Punkte hat.

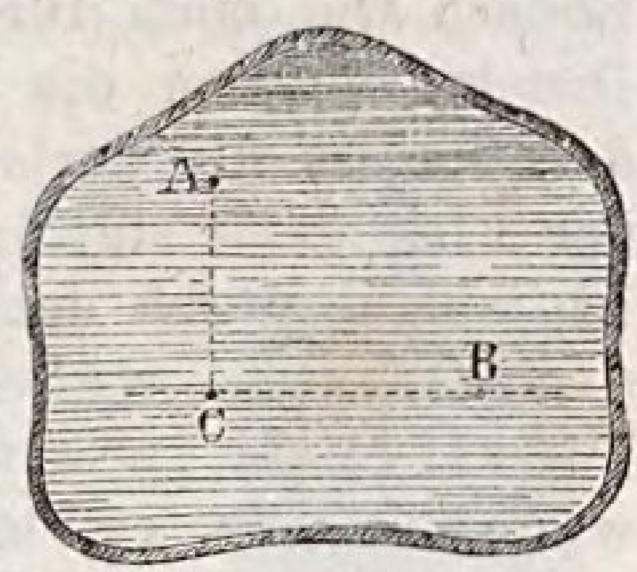


Fig. 385.

Bezeichnet p_0 den Druck auf die Flächeneinheit in dem oberen Punkte, h den vertikalen Abstand der beiden Punkte, s das

specifische Gewicht der Flüssigkeit und γ das Gewicht der Volumeneinheit Wasser, so ist der Druck in dem unteren Punkt

$$p = p_0 + h s \gamma.$$

§. 272. Der Druck, welchen eine Flüssigkeit in den verschiedenen Punkten der Wand des Gefässes ausübt, welches sie enthält, ergibt sich leicht aus demjenigen, welcher in den verschiedenen Punkten der Flüssigkeitsmasse selbst stattfindet. Wir haben gefunden, dass der Druck für alle Punkte der Flüssigkeit, welche in derselben Horizontalebene gelegen sind, gleich gross ist. Es folgt daraus, dass ein kleiner Theil der Wand des Gefässes, welcher in der Nachbarschaft des Punktes A (Fig. 386) gelegen ist, denselben Druck zu erleiden hat, als eine Fläche von gleicher Grösse, welche durch irgend einen Punkt der Horizontalebene gelegt wird, die durch diesen Punkt A hindurch geht. Der auf die Flächeneinheit bezogene Druck im Punkt A, oder der, welchen man kurz den „Druck im Punkte A" nennt, ist folglich derselbe wie der Druck, welcher in allen andern, in demselben Niveau gelegenen Punkten stattfindet. Unter den auf die Flächeneinheit bezogenen Druck auf einen Punkt A der Wandfläche aber hat man hier den Druck zu verstehen, welchen eine ebene Fläche von der Grösse der Flächeneinheit zu erleiden hat, die durch den Punkt A in der Richtung der Wand des Gefässes an dieser Stelle gelegt und in allen ihren Theilen mit derselben Stärke wie in der nächsten Nachbarschaft des Punktes A gedrückt wird. Ebenso wie oben für den Punkt A kann man sehen, dass der Druck, welchen die Wand in dem Punkte B zu erleiden hat, derselbe ist wie derjenige, welcher in irgend einem der Punkte der Flüssigkeit stattfindet, der auf der Horizontalebene gelegen ist, welche durch den Punkt B hindurchgeht. Es ist folglich der Druck, welchen eine schwere, gleichartige Flüssigkeit in einem Punkte der Wand des Gefässes, welches sie enthält, ausübt, gleich demjenigen, welchen ein anderer höher gelegener Punkt dieser Wand erfährt, vermehrt um das Gewicht des Flüssigkeitscylinders, welcher zur Basis die Flächeneinheit und zur Höhe den Niveau-Unterschied dieser beiden Punkte hat. Es ist klar, dass, wenn die beiden Punkte in demselben Niveau gelegen sind, die Drückungen, welche die Flüssigkeit in ihnen ausübt, von gleicher Grösse sein müssen.



Fig. 386.

§. 273. Das soeben gefundene Resultat lehrt uns zwar die Differenz der Drückungen finden, welche eine Flüssigkeit in zwei Punkten der Wand des Gefässes, welches sie enthält, ausübt, aber es führt uns nicht dazu, diese Drückungen selbst, welche offenbar von den Umständen, unter denen sich die Flüssigkeit befindet, abhängen, bestimmen zu können. Wenn man voraussetzt, dass diese Flüssigkeit stets in einem von allen Seiten geschlossenen Gefäss enthalten sei, so kann man sich vorstellen, dass ein Theil der Wand dieses Gefässes durch einen beweglichen Kolben ersetzt werde, an welchem eine Kraft angebracht ist. Diese Kraft drückt, indem sie den Kolben in das Innere des Gefässes zu treiben sucht, auf die Flüssigkeit; diese ihrerseits drückt wieder auf die verschiedenen Theile der Wand, durch welche sie verhindert wird, der Wirkung des Kolbens zu folgen. Aber diese Drückungen, welche durch die Flüssigkeit auf die Wand fortgepflanzt werden, sind auf gleich grossen Flächen nicht mehr von gleicher Grösse, wie dies bei einer schwerlosen Flüssigkeit der Fall war; sie zeigen Differenzen, welche aus der Wirkung der Schwerkraft auf die Flüssigkeit entspringen und deren Grösse wir oben gefunden haben.

Unter dem Vorbehalt dieser Modification, welche aus dem Gewichte der Flüssigkeit entspringt, geschieht die Fortpflanzung des Druckes in schweren Flüssigkeiten auf dieselbe Weise wie in den schwerlosen, welche wir oben zunächst betrachtet haben. Man kann manchmal sogar von dem Gewichte der Flüssigkeit abstrahiren, nämlich dann, wenn die Drückungen, welche auf sie ausgeübt werden, und welche sich auf die Wände fortpflanzen, sehr gross und die Dimensionen des Gefässes im vertikalen Sinn hinreichend klein sind. Man vernachlässigt dadurch bei den verschiedenen Drückungen nur Grössen, welche im Verhältniss zur Grösse dieser Drückungen selber nur unbedeutend sind.

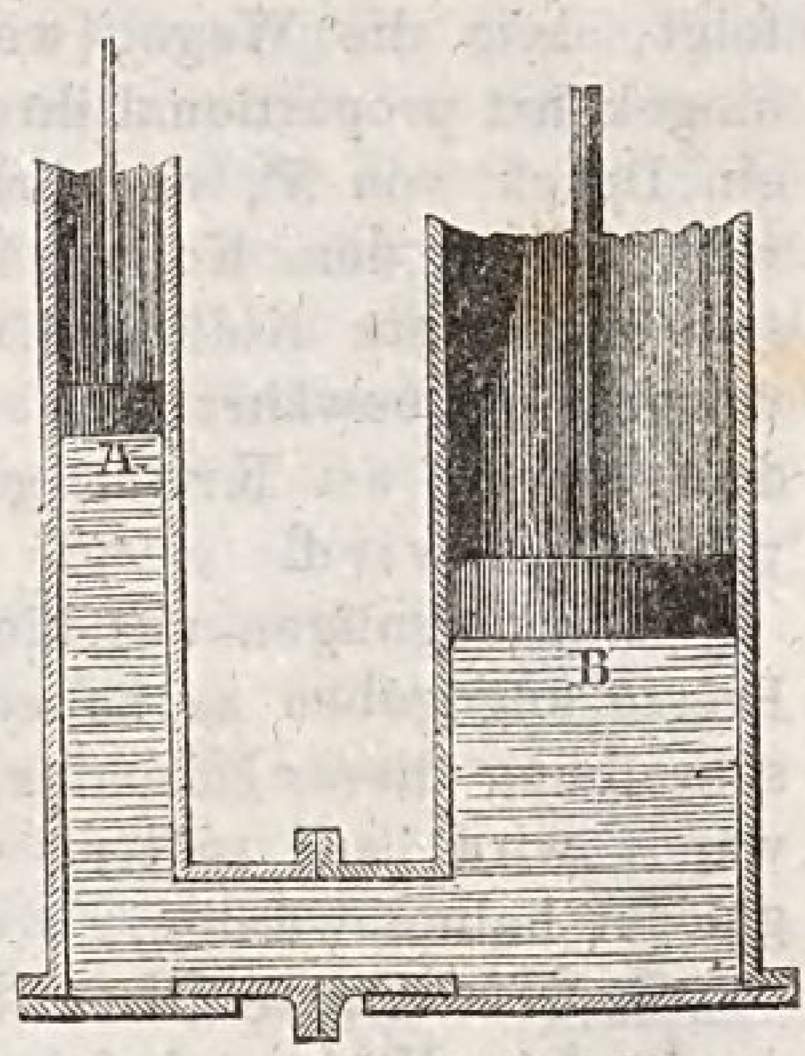


Fig. 387.

§. 274. Auf dem Princip der gleichmässigen Fortpflanzung des Druckes in den Flüssigkeiten beruht die hydraulische Presse, deren Erfindung von *Pascal* herrührt. A und B (Fig. 387) seien zwei hohle Cylinder, welche in ihren unteren Theilen mit einander in Verbindung stehen, und in welchen sich zwei dicht anschliessende Kolben bewegen

können. Setzen wir voraus, dass diejenigen Theile der Cylinder, welche sich unterhalb der Kolben befinden, sowie auch die Röhre, welche sie mit einander verbindet, mit Wasser gefüllt seien. Wenn dann auf den Kolben A ein Druck ausgeübt wird, so pflanzt sich dieser Druck auf den Kolben B fort und vergrössert sich dabei im Verhältniss der Grösse der beiden Kolbenflächen. Wenn z. B. die Fläche des Kolbens A 100 mal kleiner als diejenige des Kolbens B ist, so wird ein Druck von 5 Kilogramm, welcher auf ersteren Kolben von oben nach unten ausgeübt wird, an dem zweiten Kolben einen Druck von 500 Kilogramm von unten nach oben hervorbringen (das Gewicht des Wassers vernachlässigt). Mittelst dieses Apparates kann also mit einer gegebenen Kraft ein beliebig grosser Druck ausgeübt werden; man darf zu dem Ende nur den Kolben B hinlänglich gross im Verhältniss zu dem Kolben A nehmen. Die hydraulische Presse kann aus diesem Gesichtspunkt mit dem Hebel verglichen werden, mit welchem dasselbe Ziel erreicht werden kann.

Wenn der Kolben B der Wirkung des Druckes, welchen er erleidet, nachgibt und sich um eine bestimmte Grösse erhebt, so muss sich der Kolben A senken; aber diese beiden Kolben bewegen sich nicht um gleichviel. Die Menge des Wassers bleibt dieselbe; die Grösse also, um welche sich einerseits bei A der innere Rauminhalt des Gefässes vermindert, muss gleich sein derjenigen, um welche er sich andererseits bei B vermehrt, und weil diese Grössen gleich den Volumen zweier Cylinder sind, welche als Grundflächen die Flächen der beiden Kolben und als Höhen die Wege haben, welche diese Kolben durchlaufen, so folgt, dass die Wege, welche die beiden Kolben zurücklegen, umgekehrt proportional ihren Flächen sind. Wenn also einerseits ein Druck von 5^k, angebracht an dem Kolben A, einen Druck von 500^k an dem Kolben B hervorbringt, so muss sich andererseits der erste Kolben 100 mal so schnell als der zweite bewegen; es bewährt sich folglich auch hier wieder der Satz, dass, was an Kraft gewonnen, an Geschwindigkeit verloren wird.

Wir begnügen uns hier damit, das Wesen der hydraulischen Presse angegeben zu haben und versparen uns die nähere Beschreibung dieser Maschine, in der Form wie sie wirklich angewandt wird, auf später, wenn wir die Pumpen näher kennen gelernt haben werden.

§. 275. Freie Oberfläche einer schweren Flüssigkeit. — In dem Vorhergehenden haben wir vorausgesetzt, dass die

schwere Flüssigkeitsmasse, welche der Gegenstand unserer Untersuchungen war, den innern Raum eines von allen Seiten geschlossenen Gefässes vollständig erfüllt. Wenn dies nicht mehr der Fall ist, sei es nun, weil das Volumen der Flüssigkeit kleiner ist als der innere Rauminhalt des Gefässes oder weil das Gefäss oben offen ist, so tritt die Oberfläche der Flüssigkeit nicht in allen ihren Punkten in Berührung mit den Wänden des Gefässes. Indem die Flüssigkeit der Wirkung der Schwere folgt, erfüllt sie die tiefsten Stellen des Gefässes und bietet in ihrem obersten Theile eine freie Oberfläche dar, deren Betrachtung uns eben jetzt beschäftigen soll.

Wenn die Moleküle der Flüssigkeit ausser den Molekularkräften, welche immer vorhanden sein müssen, keiner anderen Kraft als der Wirkung der Schwerkraft unterworfen sind, und wenn kein Druck auf die verschiedenen Punkte der freien Oberfläche derselben ausgeübt wird, so stellt sich diese freie Oberfläche eben und horizontal. Um uns davon zu überzeugen, bemerken wir, dass die Resultate, welche wir in dem Vorhergehenden in Bezug auf eine schwere, im Gleichgewicht befindliche Flüssigkeit erhalten haben, ebenso gut Geltung haben für den Fall, wo sich die Flüssigkeit in eine freie Oberfläche endigt, als für den Fall, wo sie das von allen Seiten geschlossene Gefäss vollständig erfüllt. Denn es hindert uns Nichts daran, uns vorzustellen, dass das Gefäss, welches die Flüssigkeit mit freier Oberfläche enthält, dadurch vollständig geschlossen werde, dass man sich über die ganze freie Oberfläche hin eine ideale Wand eingezogen denkt, welche keinerlei Druck in den verschiedenen Punkten dieser Oberfläche ausübt; die Hinzufügung dieser Wand ändert offenbar weder die Drückungen, welche im Innern der Flüssigkeit stattfinden, noch diejenigen, welche dieselbe auf die verschiedenen Theile des Gefässes ausübt, welches sie enthält. Setzen wir nun voraus, dass die freie Oberfläche einer schweren, gleichartigen Flüssigkeit nicht eben und horizontal sei, so überzeugen wir uns leicht, dass es unmöglich ist, dass diese Flüssigkeit im Gleichgewicht bleibe. Zu diesem Behufe denken wir uns auf der freien Oberfläche der Flüssigkeit zwei Punkte A und B (Fig. 388), welche nicht in gleicher Höhe gelegen sind. Wenn wir durch diese beiden Punkte zwei Vertikale AC, BD ziehen und dieselben in zwei Punkten C, D endigen lassen, welche auf derselben Horizontalebene gelegen sind, so können die Drückungen in diesen beiden

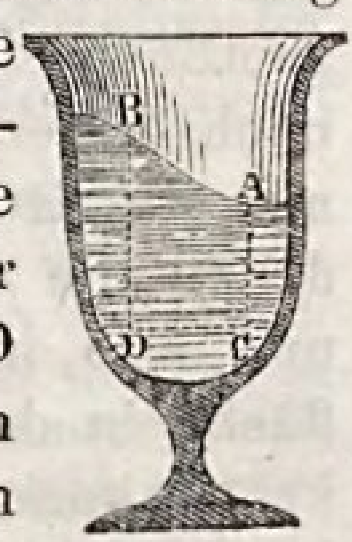


Fig. 388.

letzteren Punkten nicht gleich gross sein. Denn da die Drückungen in A und B Null sind, so sind diejenigen, welche in C und D stattfinden, gleich den Gewichten von Flüssigkeits-Cylindern, deren Basis die Flächeneinheit und deren Höhen bezüglich AC und BD sind. Diese Ungleichheit der Drückungen in C und D, welche eine nothwendige Folge davon ist, dass die Punkte A und B nicht in demselben Niveau gelegen sind, zeigt uns, dass die Flüssigkeit mit der in der Figur vorausgesetzten Form der freien Oberfläche nicht im Gleichgewicht sein kann, da in jeder schweren Flüssigkeit, die im Gleichgewicht ist, die Drückungen in allen Punkten, welche auf derselben Horizontalebene gelegen sind, gleich gross sein müssen (§. 269).

§. 276. Man kann sich noch auf eine andere Weise überzeugen, dass die freie Oberfläche einer Flüssigkeit, deren Moleküle nur der Wirkung der Schwerkraft unterworfen sind, eben und horizontal sein muss, damit die Flüssigkeit im Gleichgewicht sei. Denn wenn diese Oberfläche z. B. die in Fig. 389 angezeigte Form hätte, so müsste sich ein Molekül A, welches auf einem geneigten Theil dieser Oberfläche gelegen ist, nothwendig in Bewegung setzen. Um uns davon zu überzeugen, dürfen wir blos zusehen, in welcher Weise dieses Molekül durch sein Gewicht, welches wir uns als eine nach der Vertikalen AB abwärts wirkende Kraft vorstellen können, zu bewegen gesucht wird, indem sich dieses Gewicht mit den Wirkungen, welche das Molekül von den benachbarten erfährt, vereinigt. Diese letzteren Wirkungen können aber nur von den in nächster Nähe gelegenen Molekülen herrühren; die grössten Entfernungen, in welchen sie noch fühlbar sind, sind so klein, dass man den Theil der freien Oberfläche, welche den Punkt A bis auf diese Entfernung rings herum umgibt, als einen Theil einer ebenen Fläche betrachten kann. Daraus ist klar, dass die Molekularkräfte, welchen das Molekül A unterworfen ist, rings um die Senkrechte AC auf die freie Oberfläche symmetrisch angeordnet sind, und dass folglich die Resultante dieser Kräfte nach dieser Senkrechten gerichtet sein muss. Denken wir uns nun das Gewicht des Moleküls in zwei Seitenkräfte zerlegt, von denen die eine nach AC, die andere senkrecht darauf gerichtet und also in der Tangentialebene gelegen ist, welche die Oberfläche in dem Punkte A berührt. Die erste dieser beiden Seitenkräfte kann durch die Resultante der Wirkungen der Molekularkräfte, deren Richtung die nämliche ist, aufgehoben werden; aber

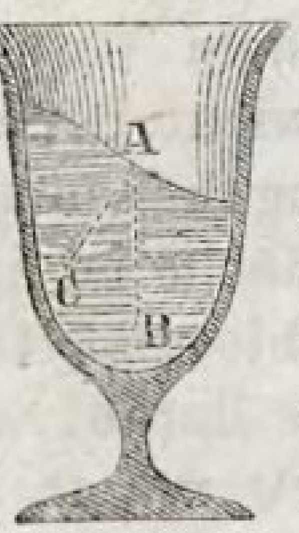


Fig. 389.

die zweite wird durch nichts gehindert, ihre Wirkung auszuüben, und macht folglich das Molekül über die Oberfläche der Flüssigkeit herabgleiten. Das Gleichgewicht kann also nicht stattfinden, so lange die Oberfläche der Flüssigkeit nicht eben und horizontal ist.

Es ist nicht zu übersehen, dass bei der vorhergehenden Entwicklung vorausgesetzt wurde, dass das Molekül A rings um die Senkrechte A C, wenigstens auf die Entfernung hin, in welcher der Einfluss der Molekularkräfte noch fühlbar ist, von Flüssigkeitsmolekülen umgeben ist. Wenn dies nicht mehr der Fall ist, wie da, wo das Molekül A zunächst der Wand des Gefässes liegt, da treten andere Verhältnisse ein, die wir weiter unten (§. 290) betrachten werden.

§. 277. **Druck auf die Wände.** — Wenn eine schwere, im Gleichgewicht befindliche gleichartige Flüssigkeit eine freie Oberfläche hat, deren verschiedene Punkte keinerlei Druck unterworfen sind, so ist es leicht, die Grösse desjenigen Druckes sowohl, welcher in jedem Punkt der Flüssigkeitsmasse stattfindet, als auch desjenigen, welchen die Flüssigkeit in jedem Theil der Wand, mit welcher sie in Berührung steht, ausübt, zu finden. Um den Druck in dem Punkte A (Fig. 390) zu erhalten, darf man nur bemerken, dass der Druck in dem Punkte B der freien Oberfläche, welcher vertikal über dem ersteren liegt, Null ist; aus §. 271 folgt also, dass der Druck im Punkte A gleich ist dem Gewichte eines Cylinders der betrachteten Flüssigkeit, welcher zur Basis die Flächeneinheit und zur Höhe den vertikalen Abstand A B des Punktes A von der freien Oberfläche der Flüssigkeit hat. Ebenso ist der Druck, welcher in dem Punkte C auf die Wand des Gefässes, welches die Flüssigkeit enthält, ausgeübt wird und welcher nach der Senkrechten C D auf den Theil der Wand, welcher den Punkt C zunächst umgibt, gerichtet ist, gleich ist dem Gewicht eines Flüssigkeitscylinders, welcher zur Basis die Flächeneinheit und zur Höhe den vertikalen Abstand C E des Punktes C von der freien Oberfläche der Flüssigkeit hat.

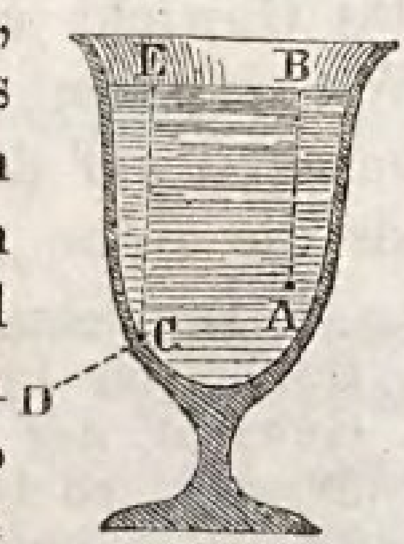


Fig. 390.

Wenn die Flüssigkeit, um welche es sich handelt, Wasser ist, so darf man sich nur erinnern, dass 1 Cubik-Centimeter Wasser 1 Gramm*) wiegt, um mit Leichtigkeit die Drückungen,

*) Damit 1 Cubik-Centimeter 1 Gramm wiege, ist es zwar nöthig, dass das Wasser rein sei, und dass es die Temperatur 4° C., bei welcher es seine grösste Dichtigkeit hat, besitze. Aber wenn es sich in den Anwendungen darum handelt, die Drückungen, welche durch gewöhnliches Wasser ausgeübt werden, zu finden, so kann man immerhin voraussetzen dass ein Cubik-Centimeter dieses Wassers 1 Gramm wiege; der Fehler, welcher dadurch begangen wird, ist allemal so klein, dass er vernachlässigt werden kann.

welche durch diese Flüssigkeit ausgeübt werden, in Zahlen ausdrücken zu können. Nehmen wir z. B. den Quadrat-Centimeter als Flächeneinheit, so werden wir finden, dass der Druck im Punkte A (Fig. 390) so viele Gramm beträgt, als die Höhe AB Centimeter misst; ebenso beträgt der Druck, welchen die Flüssigkeit im Punkte C auf die Gefässwand ausübt, so viele Gramm als die Höhe CE Centimeter enthält. Wenn man den Quadrat-Decimeter oder den Quadrat-Meter als Flächeneinheit annimmt, so werden jene Drückungen so viele Kilogramm oder so vielmal 1000 Kilogramm betragen, als die Höhen AB, CE Decimeter oder Meter enthalten.

In dem Falle, wo die betrachtete Flüssigkeit nicht Wasser ist, kann man die Drückungen, welche sie ausübt, bestimmen, sobald man das Verhältniss, welches zwischen dem Gewicht eines gewissen Volumens dieser Flüssigkeit und dem Gewicht eines gleich grossen Volumens Wasser stattfindet, d. h. sobald man das, was man die Dichtigkeit oder das spezifische Gewicht der Flüssigkeit (§. 5) heisst, kennt. Nehmen wir z. B. das Quecksilber, dessen Dichtigkeit 13,6 ist, so wird man bemerken, dass das Gewicht eines Cubik-Centimeters Quecksilber $13^{gr},6$ beträgt. Wir können folglich sagen, dass der Druck in A (Fig. 324), bezogen auf den Quadrat-Centimeter, so vielmal $13^{gr},6$ ausmacht, als die Höhe AB Centimeter enthält.

Bezeichnet im Allgemeinen h den vertikalen Abstand des betrachteten Punktes von der freien Oberfläche, s das spezifische Gewicht der Flüssigkeit und γ das Gewicht der Volumeneinheit Wasser, so ist der, von dem Gewichte der Flüssigkeit herrührende Druck in jenem Punkte

$$p = hs\gamma.$$

§. 278. Wenn man anstatt des Druckes in einem Punkte der Wand, bezogen auf die Flächeneinheit, den Druck erhalten wollte, welchen irgend ein sehr kleiner, als eben zu betrachtender Theil dieser Wand zu erleiden hat, so darf man nach dem Vorhergehenden offenbar nur das Gewicht des Flüssigkeits-Cylinders berechnen, dessen Basis dieser kleine Theil der Wandfläche und dessen Höhe der vertikale Abstand eines Punktes desselben von der freien Oberfläche der Flüssigkeit ist.

Wenn man den Druck erhalten will, welchen irgend ein Theil der Wand, welcher von der Flüssigkeit berührt wird, zu erleiden hat, so muss man diesen Theil der Wand in sehr kleine als eben zu betrachtende Theilchen zerlegen. Man bestimmt alsdann den Druck, welchen die Flüssigkeit auf jeden dieser Theile ausübt, und setzt die so erhaltenen Drückungen in eine Mittelkraft zusammen.

Wenn der Theil der Wand, welchen man betrachtet, eben ist, so haben sämmtliche Drückungen, welche seine verschiedenen Theile zu erleiden haben, parallele Richtungen und können folglich stets in eine Resultante vereinigt werden, welche gleich ihrer Summe ist (§. 46). Denken wir uns, man hätte den Schwerpunkt des Theils der Wand, mit welchem wir uns beschäftigen gefunden, indem man ihn als eine gleichmässig schwere Fläche betrachtete (§. 62). Dann ist die Resultante, von welcher wir eben gesprochen haben, gleich dem Gewicht eines Flüssigkeits-Cylinders, welcher als Basis diesen Theil der Wand und als Höhe den vertikalen Abstand seines Schwerpunkts von der freien Oberfläche der Flüssigkeit hat. Was den Angriffspunkt der Resultante betrifft, den Punkt, welchen man den Mittelpunkt des Druckes nennt, so liegt dieser nicht in dem Schwerpunkt des Theiles der Wand, welchen man betrachtet, sondern tiefer als dieser. Wir müssen uns hier begnügen, diese Resultate, deren Beweis in den Werken über rationelle Mechanik geliefert wird, blos anzuzeigen und ihre Richtigkeit in einem besonderen Beispiel darzuthun.

Es bezeichne h den vertikalen Abstand des Schwerpunkts des betrachteten Wandstücks von der Oberfläche, w die Grösse dieses Wandstücks, während s und γ dieselbe Bezeichnung wie oben behalten, so ist der Druck, welchen die Flüssigkeit in Folge ihres Gewichts auf das Wandstück ausübt

$$P = h w s \gamma.$$

§. 279. Es sei AB (Fig. 391) eine ebene und geneigte Wand, gegen welche sich eine im Gleichgewicht befindliche Flüssigkeitsmasse stützt. Setzen wir voraus, dass diese Wand die Form eines Rechtecks habe und dass zwei von den Seiten desselben horizontal seien. Dieser Fall findet z. B. seine Anwendung bei den Schützen, welche das Wasser in einem Mühlkanal stemmen, und welche aufgezogen werden können, wenn man dieses Wasser ausfliessen lassen will. Wir nehmen wie oben wieder an, dass auf die freie Oberfläche der Flüssigkeit kein Druck wirke, und dass sich diese Oberfläche, welche eben und hori-

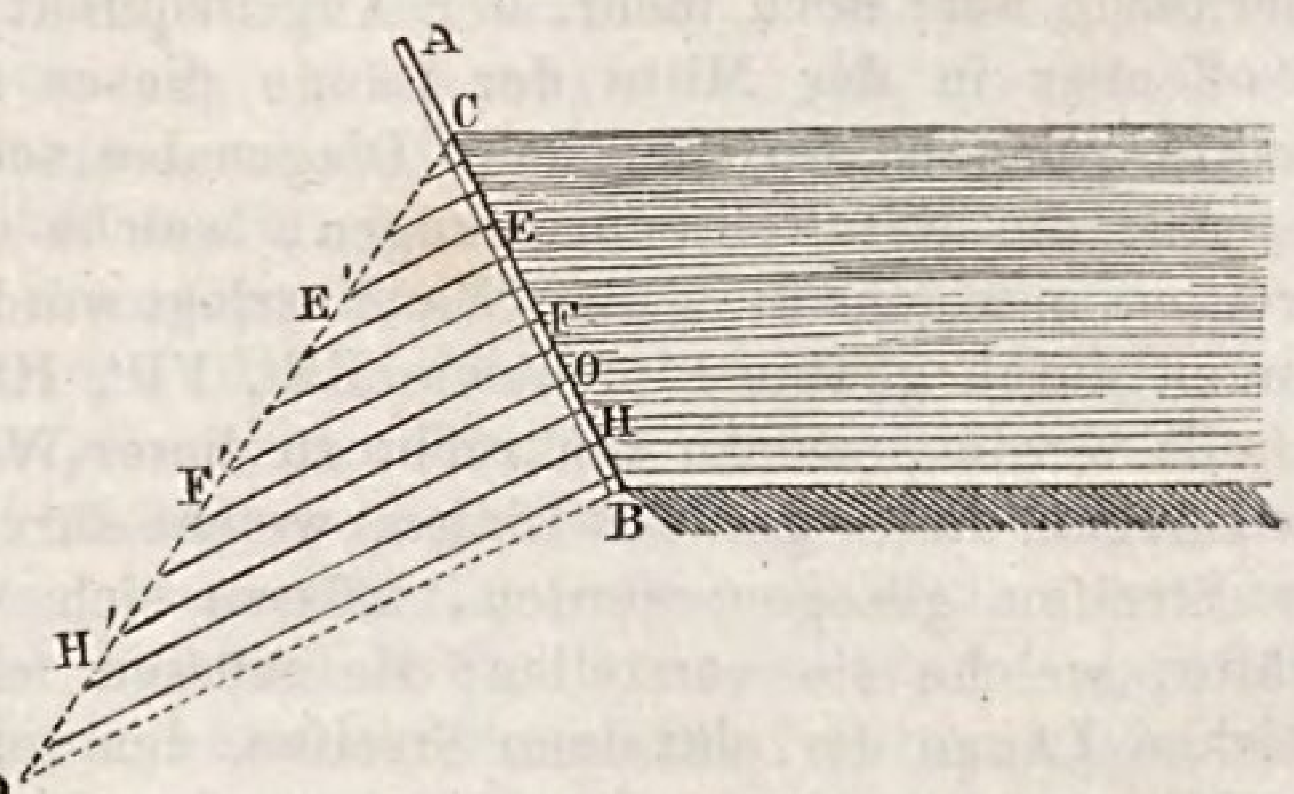


Fig. 391.

zontal sein muss, in dem Punkt C der ebenen Wand endigt, welche wir betrachten; das Wasser drückt also blos auf den Theil BC dieser Wand, welcher Theil gleichfalls rechteckig ist. Um den Druck des Wassers auf dieses Rechteck zu erhalten, theilen wir es in eine grosse Anzahl sehr schmaler horizontaler Streifen, indem wir uns auf seiner Fläche Parallelen zu seiner Grundlinie gezogen denken, welche gleich weit von einander entfernt sind (Fig. 392). Wir denken uns ferner, dass jeder solche Streifen durch Linien, welche senkrecht zu seiner Länge gerichtet sind, in eine grosse Anzahl kleiner, gleich grosser Rechtecke getheilt werde (Fig. 393). Der Druck auf jedes dieser kleinen Rechtecke ist gleich dem Druck eines Wasserprisma's, welches zur Basis dieses Rechteck und zur Höhe den vertikalen Abstand eines seiner Punkte von der freien Oberfläche der Flüssigkeit, der für alle diese Punkte als gleich gross betrachtet werden kann, hat. Alle diese Pressungen, welche die verschiedenen Rechtecke, in welche ein und derselbe Streifen zerlegt worden ist, zu erleiden haben, sind unter sich gleich, weil diese Rechtecke sämmtlich in einer und derselben Tiefe unter der freien Oberfläche der Flüssigkeit gelegen sind. Die Resultante dieser Drückungen, welche gleich der Summe derselben ist, ist folglich gleich dem Gewichte eines Wasserprisma's, das zur Basis den ganzen Streifen und zur Höhe den vertikalen Abstand irgend eines seiner Punkte von der freien Oberfläche hat; noch mehr, der Angriffspunkt dieser Resultante ist offenbar in der Mitte der Länge dieses Streifens, in dem Punkte gelegen, wo sich seine Diagonalen schneiden.

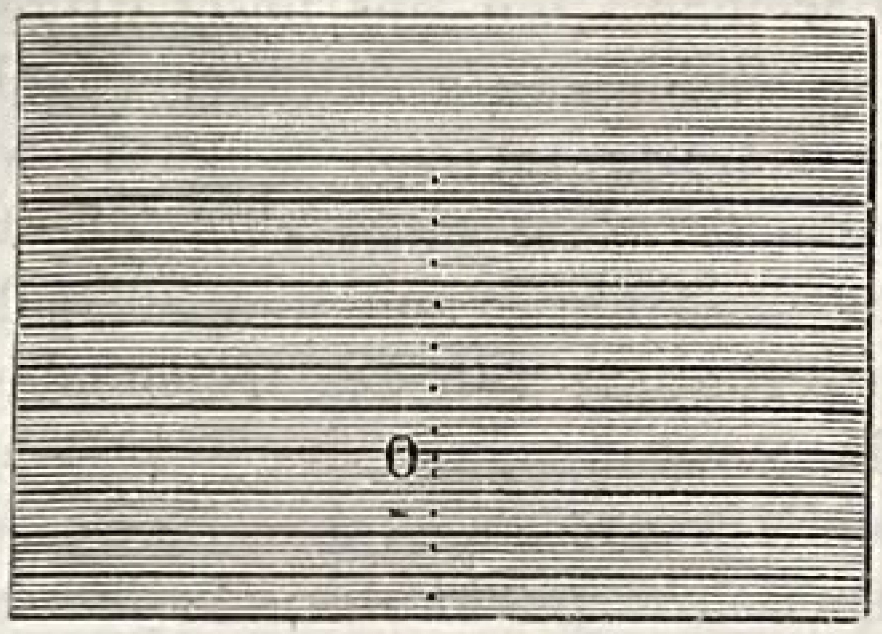


Fig. 392.

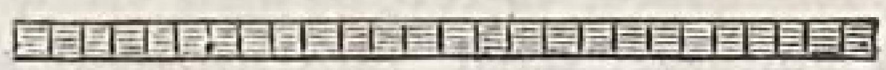


Fig. 393.

Alle die Resultantenpressungen, welche den verschiedenen Streifen, in welche die ganze Wand zerlegt worden ist, angehören, können durch gerade Linien wie EE', FF', HH' (Fig. 391) vorgestellt werden, welche senkrecht zu dieser Wand gerichtet sind. Die Längen dieser geraden Linien, welche durch die Mittelpunkte der Streifen gezogen werden, müssen sich verhalten wie die Kräfte, welche sie vorstellen; sie müssen folglich, wegen der gleichen Länge der einzelnen Streifen, den vertikalen Abständen der Mittelpunkte dieser Streifen von der freien Oberfläche des

Wassers, oder auch den Entfernungen dieser Mittelpunkte von dem Punkte C proportional sein: ihre Enden E′, F′, H′ liegen also sämmtlich auf einer und derselben geraden Linie CD, welche durch den Punkt C, wo die freie Oberfläche der Flüssigkeit die betrachtete Wand berührt, hindurch geht. Es handelt sich also blos darum, die Resultante all' der parallelen Kräfte zu finden, welche durch diese Linien vorgestellt werden; diese Resultante wird dann gleich dem Gesammtdruck sein, welchen unsere rechteckige Wand AB zu tragen hat.

Um dazu zu gelangen, denken wir uns diese Wand werde horizontal gelegt, wie es die Fig. 394 anzeigt; dann werden die Linien, welche die Kräfte vorstellen, die in den Mittelpunkten der verschiedenen Streifen, in welche wir die Wand zerlegt haben, angreifen, vertikal. Wir können uns ferner vorstellen, dass diese Linien durch schwere Stäbe von derselben Länge ersetzt würden, welche an der Wand AB aufgehängt und so gewählt sind, dass das Gewicht jedes von ihnen gleich sei der Kraft, dessen Stelle er ersetzt. Die Wand wird auf diese Weise durch die Gewichte der Stäbe ebenso belastet werden, wie sie es vorher durch die Drückungen des Wassers in ihren verschiedenen Punkten war. Wenn man sich nun diese verschiedenen Stäbe platt gedrückt denkt zu einer solchen, überall gleich grossen Breite, dass sie sämmtlich einander berühren, so sieht man, dass die gesammte Belastung, welche die Wand AB zu tragen hat, keine andere als das Gewicht des durch jene abgeplattete Stäbe gebildeten schweren Dreiecks BCD ist; und da dieses Gewicht eine vertikale Kraft ist, welche im Schwerpunkt G des Dreiecks angreift, so folgt, dass die Resultante der sämmtlichen Drückungen, welche das Wasser auf die verschiedenen Theile der Wand AB ausübt, durch den Punkt O geht, welcher vertikal über dem Schwerpunkt G gelegen ist. Dieser Punkt O liegt nach §. 62 in dem dritten Theil der Länge von BC, von dem Punkte B aus gerechnet. Für die rechteckige Wand AB also, welche wir betrachten (Fig. 391), liegt der Mittelpunkt des Druckes auf der geraden Linie, welche die Mitten der horizontalen Seiten des Rechtecks BC, das vom Wasser gedrückt wird, verbindet, und zwar im dritten Theil dieser Linie, von unten an gerechnet.

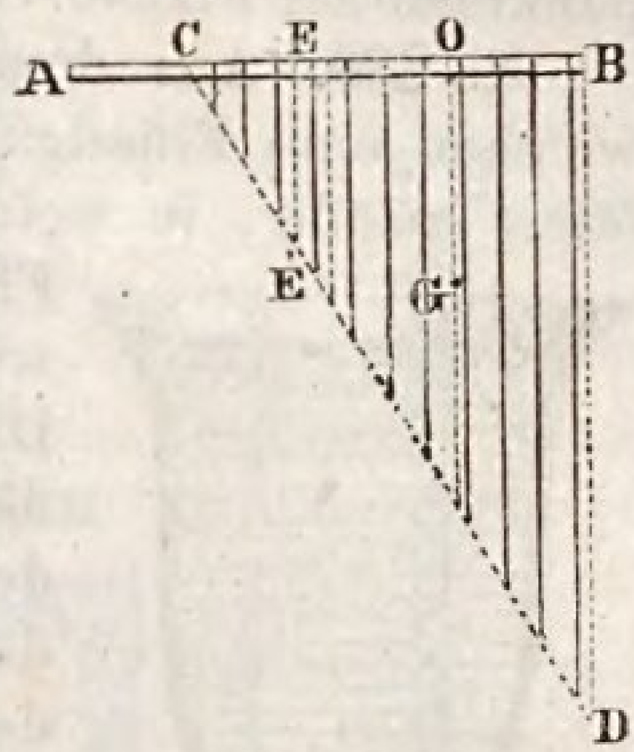


Fig. 394.

Was die Grösse des Gesammtdruckes betrifft, so sieht man aus Fig. 394, dass dieser derselbe ist, als wenn die schweren Stäbe, anstatt dass ihre Länge von C bis D gleichförmig zunimmt, alle die nämliche Länge gleich derjenigen des Stabes hätten, der in der Mitte von BC aufgehängt ist. Man kann also sagen, dass der Gesammtdruck, welcher von der rechteckigen Wand AB getragen wird, gleich ist demjenigen, welchen sie zu tragen hätte, wenn alle ihre Punkte gleiche Entfernungen, die Entfernung des Schwerpunktes der Wand, der in der Mitte von B C gelegen ist, haben würden, oder auch, dass dieser Druck gleich ist dem Gewichte eines Wasserprismas, welches zur Basis die ganze gedrückte Fläche und zur Höhe den vertikalen Abstand des Schwerpunkts dieser Fläche von der freien Oberfläche der Flüssigkeit hat.

§. 280. Aus dem Vorhergehenden folgt, dass der Druck, welchen eine Flüssigkeit auf den Boden AB (Fig. 395) des Gefässes ausübt, in welchem sie enthalten ist, dem Gewichte der Flüssigkeitssäule A B C D gleich sein muss, welche vertikal über diesem Boden steht. Dieser Druck hängt also blos von der Bodenfläche und von der Höhe der freien Oberfläche der Flüssigkeit über derselben ab; die Form der Seitenwände hat keinerlei Einfluss auf denselben, und selbst wenn sich das Gefäss nach oben verengert (Fig. 396 oder 397), so ist doch der Druck auf die Bodenfläche stets gleich dem Gewichte der Flüssigkeit, welche in dem Cylinder A B C D enthalten ist, obgleich der Umfang dieses Cylinders nicht vollständig innerhalb der Flüssigkeitsmasse liegt.

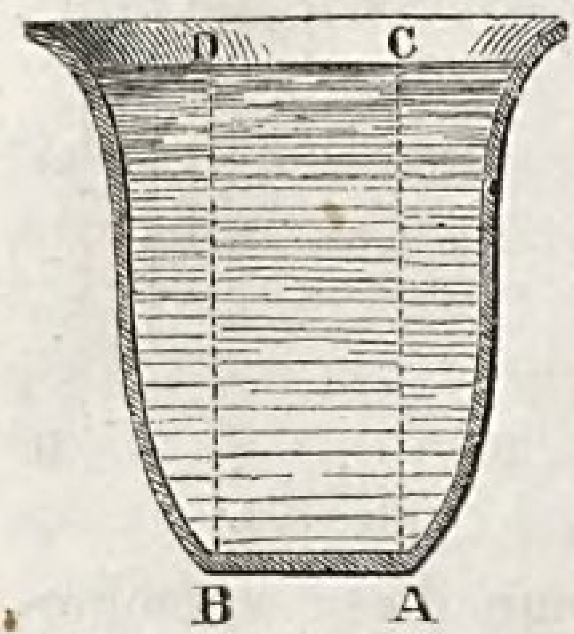


Fig 395.

Diese specielle Folgerung aus den Gesetzen, welche wir oben kennen gelernt haben, kann auf folgende Art mittelst des *Haldat*'schen Apparates bestätigt werden. Dieser Apparat (Fig. 398) besteht aus einer horizontalen Röhre, an deren beiden Enden zwei andere vertikal stehende Röhren angebracht sind. Die eine von diesen letzteren Röhren, welche kürzer als die andere ist, ist mit einer Metallfassung *a* versehen, in welcher inwendig ein Schraubengewinde eingeschnitten ist, in welches man nach und nach Gefässe von verschiedener Form einschrauben kann. Das Gefäss, welches in Fig. 398 auf dieser Metallfassung befestigt ist, erweitert sich stetig von unten nach

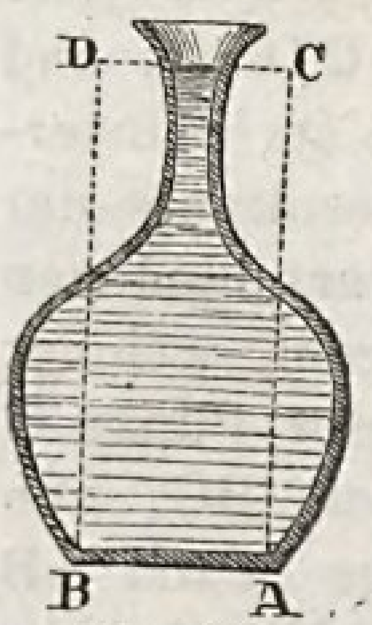


Fig. 396.

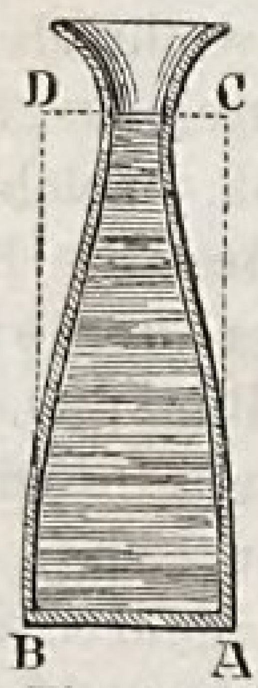


Fig. 397.

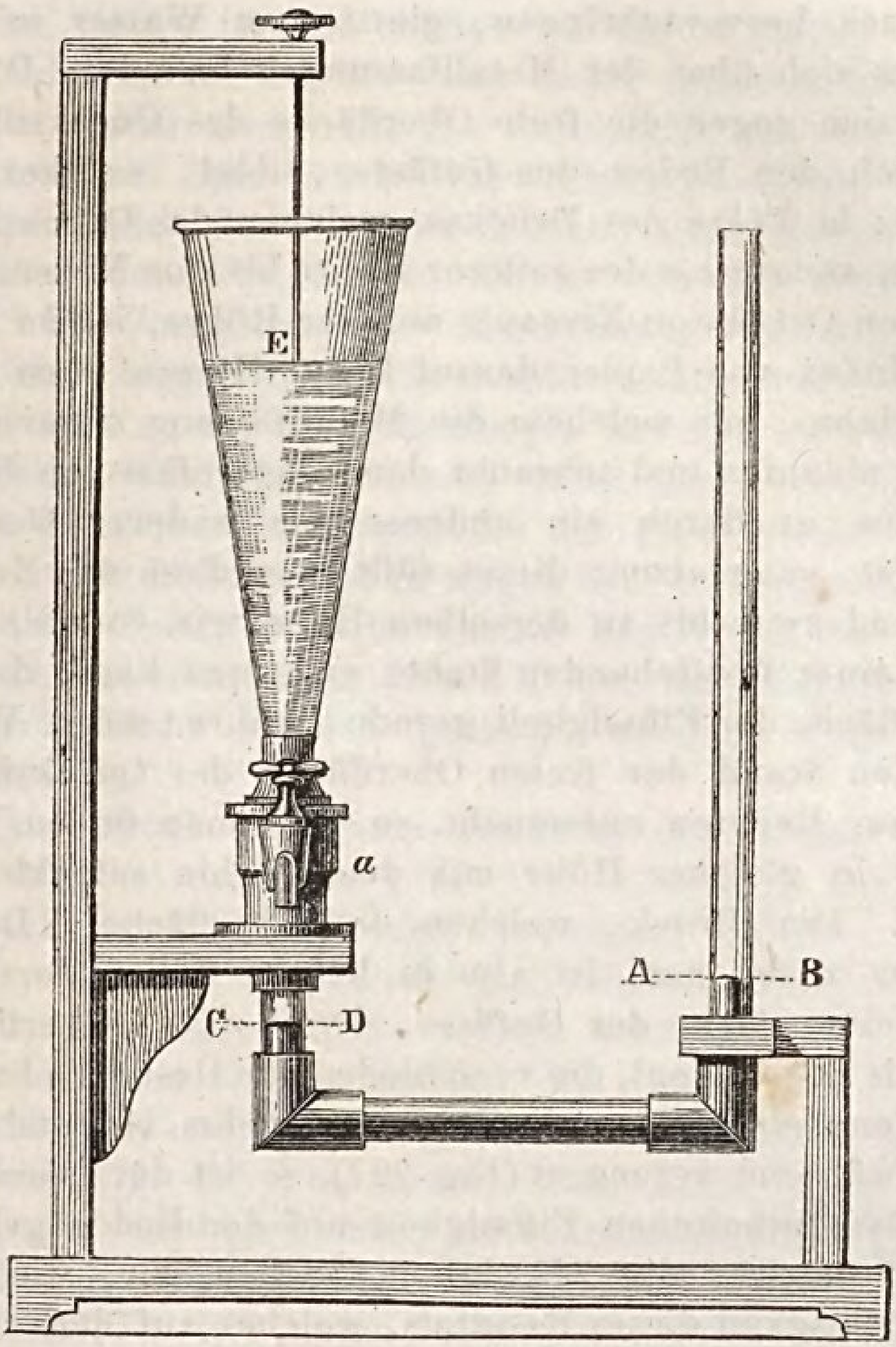


Fig. 398.

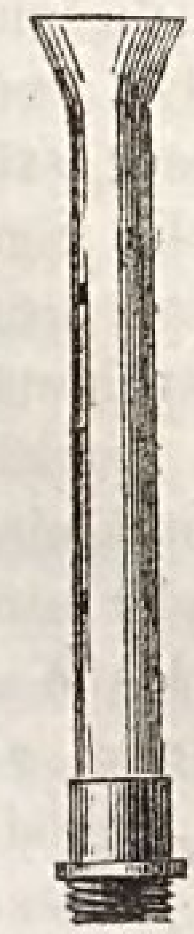


Fig. 399.

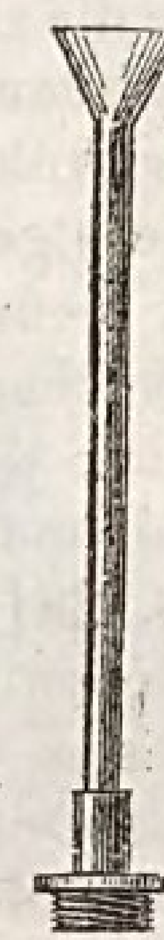


Fig. 400.

oben und bildet auf diese Weise fast die Gestalt eines Trichters. Die Fig. 399 und 400 stellen zwei andere Gefässe vor, welche auf dieselbe Metallfassung aufgeschraubt werden können; es sind dies einfache Röhren von verschiedenem Durchmesser, welche sich oben etwas erweitern, damit sie bequem mit einer Flüssigkeit gefüllt werden können. Um den Versuch, zu welchem dieser Apparat bestimmt ist, anzustellen, giesst man in den unteren Theil desselben so viel Quecksilber, dass die horizontale, sowie ein Theil der beiden vertikalen Röhren dadurch gefüllt wird. Das Quecksilber steigt in diesen beiden letzteren Röhren gleichhoch (s. später §. 284); aber wenn man gegen die freie Oberfläche dieser Flüssigkeit in der linken Röhre einen Druck ausübt, so wird sie in die andere Röhre hinübergedrückt und sich dort um so mehr erheben, je stärker der angewandte Druck ist.

Um diesen Druck hervorzubringen, giesst man Wasser in das Gefäss, welches sich über der Metallfassung *a* befindet. Dieses Wasser stützt sich gegen die freie Oberfläche des Quecksilbers, welche eigentlich den Boden des Gefässes bildet, welches das Wasser enthält; in Folge des Druckes, welchen das Quecksilber dadurch erfährt, steigt es in der anderen Röhre bis zum Niveau AB. Man markirt den Ort dieses Niveau's auf der Röhre, indem man einen kleinen Index von Papier darauf klebt. Hierauf lässt man mittelst eines Hahns, mit welchem die Metallfassung *a* versehen ist, das Wasser ablaufen und schraubt dann das Gefäss von dieser Fassung ab, um es durch ein anderes von anderer Gestalt, Fig. 399 oder 400, zu ersetzen; dieses füllt man dann von Neuem mit Wasser, und zwar bis zu derselben Höhe wie vorhin, was man mit Hilfe eines feststehenden Stabes erkennen kann, dessen Spitze die Oberfläche der Flüssigkeit gerade berühren muss. Wenn man alsdann den Stand der freien Oberfläche des Quecksilbers in der Röhre zur Rechten untersucht, so wird man finden, dass sie sich genau in gleicher Höhe mit dem vorhin aufgeklebten Index befindet. Der Druck, welchen die Oberfläche CD des Quecksilbers zu tragen hat, ist also in beiden Fällen derselbe, obgleich die Seitenwände der Gefässe, denen diese Oberfläche nacheinander als Boden dient, die verschiedensten Gestalten haben.

§. 281. Wenn ein Gefäss einen breiten Boden hat und sich nach oben fortwährend verengert (Fig. 397), so ist der Druck der in diesem Gefäss enthaltenen Flüssigkeit auf den Boden grösser als das Gesammtgewicht der Flüssigkeit. Sehen wir, wie man sich von der Richtigkeit dieses Resultats, welches auf den ersten Anblick unmöglich zu sein scheint, überzeugen kann.

Wenn man ein Gefäss zuerst leer und dann mit einer Flüssigkeit gefüllt wiegt, so gibt der Ueberschuss des zweiten Gewichts über das erste das Gewicht der Flüssigkeit, welche in das Gefäss gegossen worden ist. Sehen wir, auf welche Art die Flüssigkeit auf das Gefäss wirkt, um ihm diese Vergrösserung seines Gewichtes mitzutheilen. Jeder Theil der inneren Wandfläche des Gefässes, welcher von der Flüssigkeit berührt wird, erfährt von derselben einen Druck, welcher von der Grösse dieses Wandstücks und von seinem vertikalen Abstand von der freien Oberfläche der Flüssigkeit abhängig ist. Diese sämmtlichen Drückungen, welche von der Flüssigkeit auf die verschiedenen Theile der Gefässwand ausgeübt werden, mit welchen sie in Berührung steht, vereinigen sich in eine Resultante, welche, wie der Versuch zeigt, gleich dem Gewichte der ganzen Flüssigkeit

ist; das Gefäss ist also schliesslich der Wirkung seines eigenen Gewichtes, sowie der Wirkung dieser letzteren Resultante unterworfen. Aber man muss die Resultante, von der hier die Rede ist, nicht mit dem Drucke verwechseln, welchen die Flüssigkeit auf den Boden des Gefässes ausübt, denn dieser Boden ist nur ein Theil der Wandfläche, welche von der Flüssigkeit berührt wird. Die Resultante der sämmtlichen Pressungen, welche die Flüssigkeit gegen die Gefässwände ausübt, kann erhalten werden, indem man zuerst die Drückungen auf die verschiedenen Punkte der Seitenwände des Gefässes unter sich vereinigt und alsdann die so erhaltene Theilresultante mit dem Drucke zusammensetzt, welchen die Bodenfläche zu tragen hat; nun kann es wohl kommen, dass diese Theilresultante, anstatt den Druck auf den Boden des Gefässes zu vermehren, diesen Druck im Gegentheil vermindert. Es kann leicht deutlich gemacht werden, wann dies der Fall sein muss.

Der Druck in einem Punkt C der Wand eines Gefässes (Fig. 401) ist nach der Linie CD, senkrecht auf die Wand des Gefässes in diesem Punkte gerichtet. Dieser Druck, welcher von innen nach aussen wirkt, kann in zwei Seitenkräfte zerlegt werden, von denen die eine CE horizontal, die andere CF vertikal gerichtet ist. Die letztere Componente geht in Fig. 401 von unten nach oben; sie würde von oben nach unten gerichtet sein, wenn man bei der angenommenen Gestalt des Gefässes den Punkt C weiter unten, näher an dem Boden AB genommen haben würde. Wenn man eine ähnliche Zerlegung für alle die Drückungen, welche die verschiedenen Theile der Seitenwände des Gefässes zu erleiden haben, durchführt, so wird man eine Reihe von horizontalen Componenten, wie CE, und eine Reihe von vertikalen Componenten, wie CF, finden. Die horizontalen Seitenkräfte, deren Richtungen rings um das Gefäss herum auseinander gehen, heben sich, wie man leicht sieht, wenn man etwas tiefer auf sie eingeht, gegenseitig auf; ausserdem ist klar, dass sie, wenn sie sich nicht zerstörten, das Gefäss in horizontalem Sinne bewegen würden, was offenbar niemals der Fall sein kann.

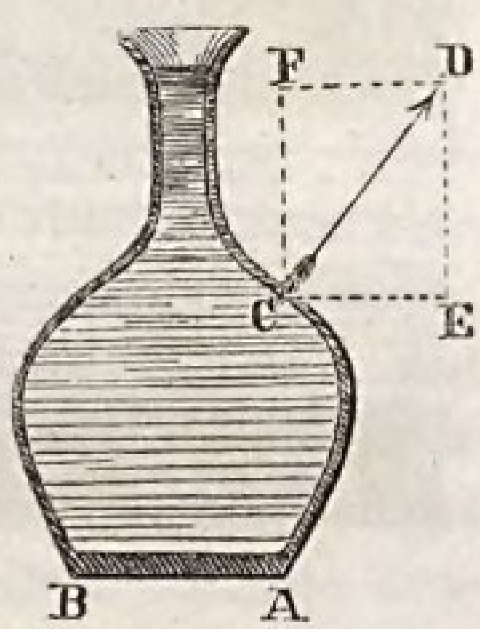


Fig. 401.

Was die vertikalen Componenten betrifft, so sind sie sämmtlich parallel unter sich; die einen sind von unten nach oben, die anderen von oben nach unten gerichtet; und da eine Drehung des Gefässes durch dieselben niemals stattfindet, so können sie

stets durch eine einzige Kraft ersetzt werden (§. 49), welche vertikal von unten nach oben oder von oben nach unten gerichtet ist, unter Umständen aber auch Null werden kann. Diese einzige so erhaltene Kraft ist genau die Theilresultante, von welcher wir oben gesprochen haben. Man sieht also, dass diese Theilresultante den Druck auf den Boden, indem sie mit demselben vereinigt wird, vermehren oder vermindern kann, je nachdem sie von oben nach unten oder von unten nach oben wirkt. In dem ersten Fall wird der Druck auf den Boden des Gefässes kleiner als das Gesammtgewicht der Flüssigkeit, in dem zweiten Fall dagegen wird er grösser als dieses Gewicht sein.

§. 282. Wir können uns mit Hilfe des Vorhergehenden Rechenschaft über die Grösse des Druckes geben, welchen in gewissen Fällen Flächen, gegen welche sich eine Flüssigkeitsmasse stützt, zu erleiden haben. Nehmen wir als Beispiel eine Scheidewand, wie sie im Innern eines Bergwerks, in einem Stollen AB (Fig. 402) aufgerichtet wird, um alle Verbindung zwischen den Theilen A und B desselben zu unterbrechen und dadurch zu verhindern, dass das Wasser, welches durch die Spalten und Poren des Erdreichs dringt und sich in B ansammelt, auch den Theil A überschwemmt. In B füllt sich der Stollen vollständig mit Wasser, und die Flüssigkeit verbreitet sich bis zu einer grossen Höhe über dem Stollen, einer Höhe, die oft mehrere hundert Meter beträgt, ohne Unterbrechung in alle Spalten, welche mit B in Verbindung stehen. Setzen wir voraus, dass die freie Oberfläche des Wassers in den Spalten des Erdreichs 100 Meter über dem Mittelpunkt der Scheidewand liege, so ist der Druck, welchen ein Quadratmeter der Fläche der Scheidewand zu tragen hat, gleich dem Gewichte von 100 Cubikmeter Wasser, d. h. gleich 100 000 Kilogramm. Wenn daher die Scheidewand eine Fläche von 2 Quadratmeter hat, so ist der Gesammtdruck, welchen sie zu tragen hat, gleich 200 000 Kilogramm. Man begreift, dass man auf den Bau einer solchen Scheidewand grosse Sorgfalt zu verwenden hat, damit sie einem so enormen

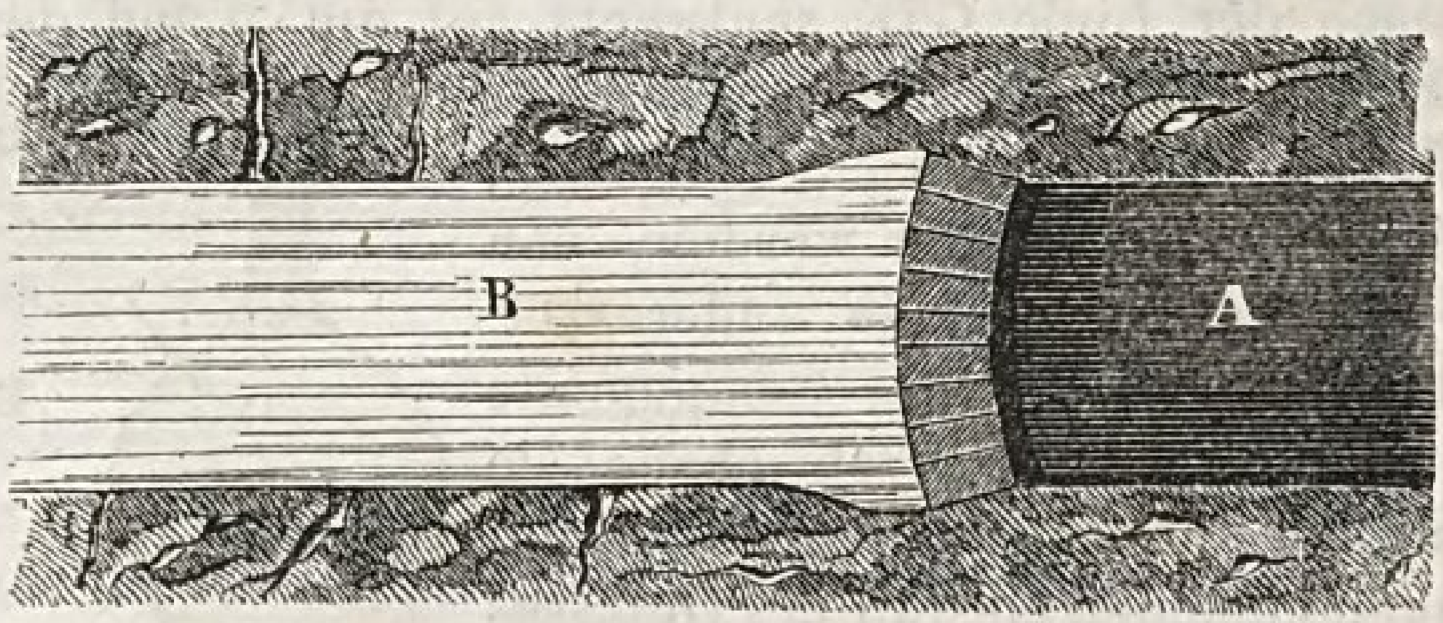


Fig. 402.

Druck zu widerstehen vermag. Daher baut man sie oft in Form von Gewölben (Fig. 402) und zwar in der Art, dass der Druck auf die convexe Oberfläche des Gewölbes ausgeübt wird; man sieht, dass in Folge dieser Anordnung die Scheidewand dem Drucke der Flüssigkeit nur nachgeben kann, indem sie die Wände des Stollens, gegen welche sie sich stützt, auseinander drückt.

In dem überschwemmten Theile B des Bergwerks übt das Wasser einen ungeheueren Druck gegen alle Wände aus, welche es berührt. Dieser Druck findet ebensowohl auf die Deckenwände der Höhlungen, in welchen sich das Wasser verbreitet, wie auf den Boden und auf die Seitenwände derselben statt. Das Wasser kann in einem solchen Fall sogar kräftig mitwirken, das Erdreich, welches über diesen Höhlungen gelegen ist, zu unterstützen; und wenn man es dann mittelst Pumpen ausschöpft, um die Arbeiten in dem Theil des Bergwerks, welcher überschwemmt war, wieder aufzunehmen, so werden dadurch zahlreiche Einstürzungen hervorgerufen, da das Erdreich nun nicht mehr so unterstüzt wird, wie es vorher der Fall war.

§. 283. **Grenzfläche zweier Flüssigkeiten.** — Wenn zwei verschiedene Flüssigkeiten, welche sich nicht miteinander mischen, zugleich in einem und demselben Gefäss enthalten sind, so nimmt jede derselben einen Theil des Rauminhalts des Gefässes ein und berührt die andere in einer gewissen Oberfläche, welche die gemeinschaftliche Grenze beider bildet. Wenn die beiden Flüssigkeiten nicht die nämliche Dichtigkeit haben, was im Allgemeinen immer der Fall sein wird, so kann Gleichgewicht nur dann bestehen, wenn die Grenzfläche, in welcher sich die beiden Flüssigkeiten berühren, eben und horizontal ist. Denn nehmen wir an, dass nicht alle Punkte dieser Fläche in einer und derselben Horizontalebene gelegen seien (Fig. 403), so können wir leicht nachweisen, dass das Gleichgewicht nicht stattfinden kann. Es seien A und B zwei Punkte, welche in einer und derselben Horizontalebene in der unteren Flüssigkeit gelegen sind, und C und D zwei andere, vertikal über diesen gelegene Punkte, welche gleichfalls in einer Horizontalebene in der oberen Flüssigkeit liegen. Die Vertikalen AC, BD durchschneiden die Grenzfläche der beiden Flüssigkeiten in den Punkten E und F, und man kann voraussetzen, dass die Punkte A und B so gewählt worden sind, dass die Höhen AE, BF ungleiche Grössen haben, was bei der Annahme, welche wir über die Grenzfläche gemacht haben, immer möglich

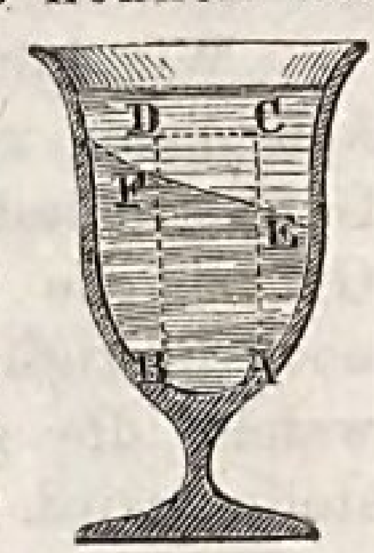


Fig. 403.

sein muss. Wenn Gleichgewicht besteht, so müssen die Drückungen, die in den Punkten C und D stattfinden, einander gleich sein (§. 269). Aber wenn man hier dieselbe Betrachtungsweise wie im §. 270 anwendet, so wird man finden, dass der Druck, welcher in A auf eine sehr kleine, horizontale Fläche ausgeübt wird, gleich ist dem Druck, welcher in C auf eine eben solche Fläche stattfindet, vermehrt um das Gewicht der Flüssigkeit, welche der vertikale Cylinder enthält, welcher jene beiden Flächen als untere und obere Grundflächen besitzt. Ebenso ist der Druck, welcher in B auf eine Fläche von der nämlichen Ausdehnung und Beschaffenheit wie die in A stattfindet, gleich dem Druck, welcher in D auf eine gleich grosse Fläche ausgeübt wird, vermehrt um das Gewicht der Flüssigkeit, welche ein vertikaler Cylinder enthält, der sich von B bis D erstreckt und jene beiden Flächen als Grundflächen enthält. Aber das Gewicht der Flüssigkeit, welche in dem ersten dieser beiden Cylinder enthalten ist, kann nicht dasselbe sein, als dasjenige der Flüssigkeit in dem zweiten Cylinder; denn während beide Cylinder gleichen Rauminhalt haben, enthält der eine mehr von der schwereren Flüssigkeit als der andere, und dieser Unterschied kann durch die entsprechende Differenz der Quantitäten der leichteren Flüssigkeit in beiden Cylindern offenbar nicht ausgeglichen werden. Es folgt daraus, dass die Drückungen, welche in A und B auf zwei kleine Flächen von gleicher Ausdehnung ausgeübt werden, nicht gleich gross sind. Es kann also nicht Gleichgewicht stattfinden, weil eine nothwendige Folge dieses Gleichgewichtes die sein müsste, dass die Drückungen auf gleich grosse Flächen in allen Punkten, welche auf einer und derselben Horizontalebene irgendwo im Innern der Flüssigkeitsmasse gelegen sind, gleiche Grösse haben (§. 269).

Wir können somit sagen, dass sich zwei schwere Flüssigkeiten von verschiedener Dichtigkeit, welche sich in demselben Gefäss befinden, allemal in solcher Weise anordnen, dass ihre Grenzfläche eben und horizontal ist. Wir können ausserdem noch hinzufügen, dass sich die schwere Flüssigkeit, diejenige, welche die grössere Dichtigkeit hat, stets **unter** die andere stellen wird. Diese letztere Bedingung ist zwar für das Gleichgewicht nicht unerlässlich nothwendig; dasselbe kann möglicherweise auch stattfinden, wenn sich die leichtere, d. h. weniger dichte Flüssigkeit am Boden des Gefässes befindet und die andere dichtere über ihr steht; aber man sieht auf den ersten Blick, dass dieses Gleichgewicht ein labiles wäre; in Folge der

grossen Beweglichkeit der Flüssigkeiten würde die geringfügigste Ursache hinreichen, es zu stören und die dichtere Flüssigkeit auf den Boden des Gefässes zu führen.

Wenn mehr als zwei Flüssigkeiten, die nicht mit einander mischbar sind und verschiedene Dichtigkeiten besitzen, in einem und demselben Gefäss enthalten sind, so ist klar, dass sich diese Flüssigkeiten so übereinander anordnen werden, dass ihre Dichtigkeiten vom Boden bis zur Oberfläche abnehmen, und dass die Grenzfläche je zweier von ihnen eben und horizontal ist. Wenn man Quecksilber, Wasser und Oel in das nämliche Gefäss giesst, so stellt sich, auch nachdem man die Flüssigkeiten zuerst gut unter einander geschüttelt hat, im Zustande der Ruhe das Quecksilber am tiefsten, auf den Boden des Gefässes, darüber lagert sich das Wasser und über dieses wieder das Oel. Es ist klar, dass der Druck in irgend einem Punkte einer solchen Flüssigkeitsmasse, wenn er lediglich von dem Gewichte derselben herrührt, gleich ist dem Gewichte eines Flüssigkeitscylinders, welcher als Basis die Flächeneinheit und als Höhe den vertikalen Abstand dieses Punktes von der freien Oberfläche hat und in welchem die Flüssigkeiten ganz in derselben Weise angeordnet sind, wie sie von der horizontalen Ebene, in welcher der betrachtete Punkt gelegen ist, bis zur freien Oberfläche auf einander folgen.

§. 284. **Communicirende Gefässe.** — Wenn zwei Gefässe in ihren unteren Theilen miteinander in Verbindung stehen und, man giesst eine Flüssigkeit in das eine von diesen, so vertheilt sich dieselbe in beide Gefässe und setzt sich darin ins Gleichgewicht. Die freie Oberfläche der Flüssigkeit in jedem dieser beiden Gefässe ist, wie aus dem Vorhergenden folgt, eben und horizontal; und wenn man diese beiden Oberflächen miteinander vergleicht, so erkennt man, dass sie in derselben Höhe gelegen sind; d. h. wenn man die Horizontalebene, welche die Oberfläche der Flüssigkeit in dem einen Gefäss bildet, erweitern würde, so würde sie durch die Oberfläche der Flüssigkeit in dem andern Gefäss hindurch gehen. Dies kann leicht auf folgende Art nachgewiesen werden.

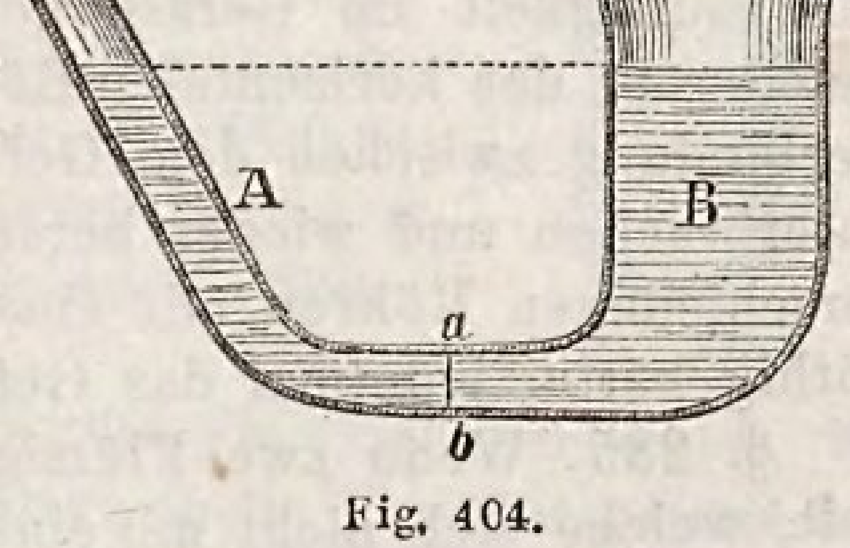


Fig. 404.

Es seien A, B (Fig. 404) zwei communicirende Gefässe, in welche eine Flüssigkeit eingegossen worden und darin in's Gleichgewicht

gekommen ist; dieses Gleichgewicht wird offenbar nicht gestört, wenn man sich an irgend einer Stelle eine feine Wand *ab* eingeschaltet denkt. Diese Wand erleidet auf beiden Seiten von den beiden Gefässen her Drückungen, welche nothwendig gleich gross sein müssen, wenn das Gleichgewicht der Flüssigkeit auch ohne die Gegenwart dieser Wand stattfinden soll. Nun ist der Druck, welchen die Wand *ab* von Seite der Flüssigkeit im Gefäss A zu erleiden hat, gleich dem Gewicht einer Flüssigkeitssäule, welche diese Wand zur Grundfläche und den vertikalen Abstand ihres Schwerpunkts von der Oberfläche der Flüssigkeit im Gefäss A zur Höhe hat. (§. 277). Ebenso ist der Druck, welchen die Wand *ab* von Seite der Flüssigkeit im Gefäss B erleidet, gleich dem Gewicht einer Flüssigkeitssäule, welche diese Wand als Grundfläche und den vertikalen Abstand ihres Schwerpunktes von der Oberfläche der Flüssigkeit im Gefäss B zur Höhe hat. Da nun diese beiden Drückungen, wie oben gesagt, genau gleich sein müssen, so muss der Schwerpunkt der Wand *ab* von den Oberflächen der Flüssigkeit in beiden Gefässen gleichen vertikalen Abstand haben, was nur möglich ist, wenn diese Oberflächen in der nämlichen Horizontalebene gelegen sind.

Das Gesetz, welches wir soeben gefunden haben, kann mittelst des in Fig. 405 dargestellten Apparats durch den Versuch erwiesen werden. Dieser Apparat besteht aus einem Glasgefäss, welches unten mit einer horizontalen Röhre versehen ist, am deren Ende sich eine Glasröhre vertikal erhebt. Wenn man in das Gefäss Wasser giesst, so verbreitet sich dasselbe theilweise auch in die Glasröhre, indem es die horizontale Röhre, welche dieselbe mit dem Gefäss verbindet, durchfliesst; und es ist leicht zu erkennen, dass die freien Oberflächen der Flüssigkeit in der Röhre, wie in dem Gefäss in derselben Horizontalebene AB gelegen sind. Wenn man hierauf die Glasröhre abnimmt, um sie durch eine andere von verschiedener Gestalt zu ersetzen (Fig. 406 oder 407), so findet man, dass die Oberflächen des Wassers A′ B′ oder A″ B″ in denselben stets in der erweiterten freien Oberfläche der Flüssigkeit im Gefäss gelegen sind. Durch einen Hahn, welcher in der horizontalen Röhre angebracht ist, kann man die Verbindung zwischen dem Gefäss und der Röhre nach Belieben unterbrechen und wieder herstellen nnd so mit Leichtigkeit die verschiedenen Röhren mit einander vertauschen, ohne dass man nöthig hätte, jedesmal das Gefäss zu entleeren.

§. 285. Wenn zwei Flüssigkeiten von verschiedener Dichtigkeit, welche sich nicht mit einander mischen, zusammen in com-

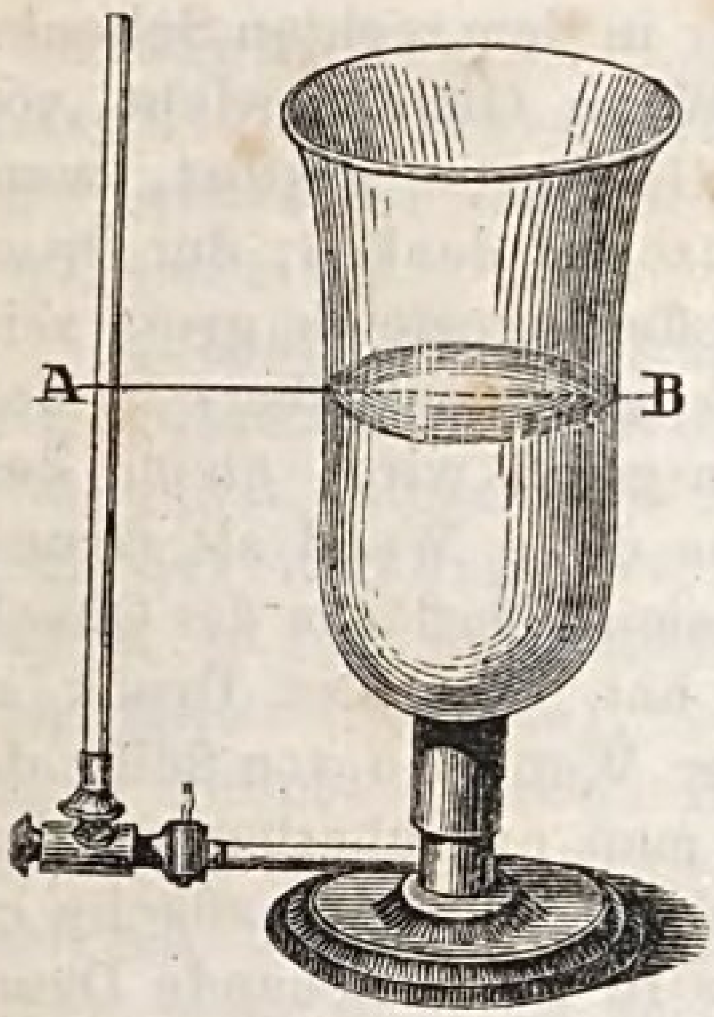


Fig. 405.

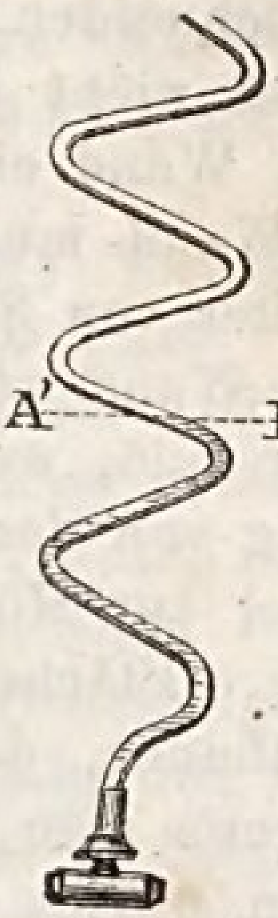


Fig. 406.

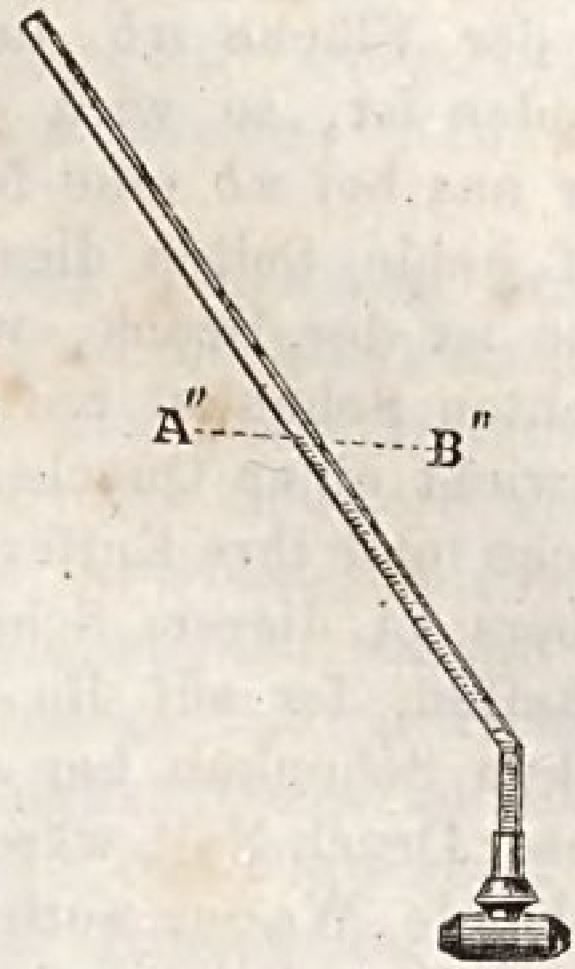


Fig. 407.

municirende Gefässe gebracht werden, so verhalten sich dieselben nicht mehr so wie in dem eben behandelten Fall, wo man nur eine einzige Flüssigkeit hatte. Setzen wir voraus, man nehme eine zweimal gebogene Glasröhre (Fig. 408), welche an beiden Enden offen und so gestellt ist, wie es die Figur anzeigt; wenn man in diese Röhre Quecksilber giesst, so verbreitet sich dasselbe in den horizontalen Theil derselben und in die beiden vertikalen Schenkel; und nachdem es sich in's Gleichgewicht gesetzt hat, werden seine freien Oberflächen in den beiden Schenkeln in derselben Horizontalebene gelegen sein. Wenn man hierauf in den längeren linken Schenkel Wasser giesst, so übt dasselbe einen Druck auf das Quecksilber aus; in Folge dessen wird dasselbe theilweise nach dem rechten Schenkel hinübergedrängt, sein Niveau in diesem Schenkel muss sich also heben. Aber wenn das Gleichgewicht hergestellt ist, so findet sich die freie Oberfläche des Wassers in dem linken Schenkel nicht mehr in derselben Horizontalebene wie die des Quecksilbers in dem rechten; diese beiden Oberflächen müssen im Gegentheil in sehr verschiedenen Höhen gelegen sein, wie wir uns leicht überzeugen können.

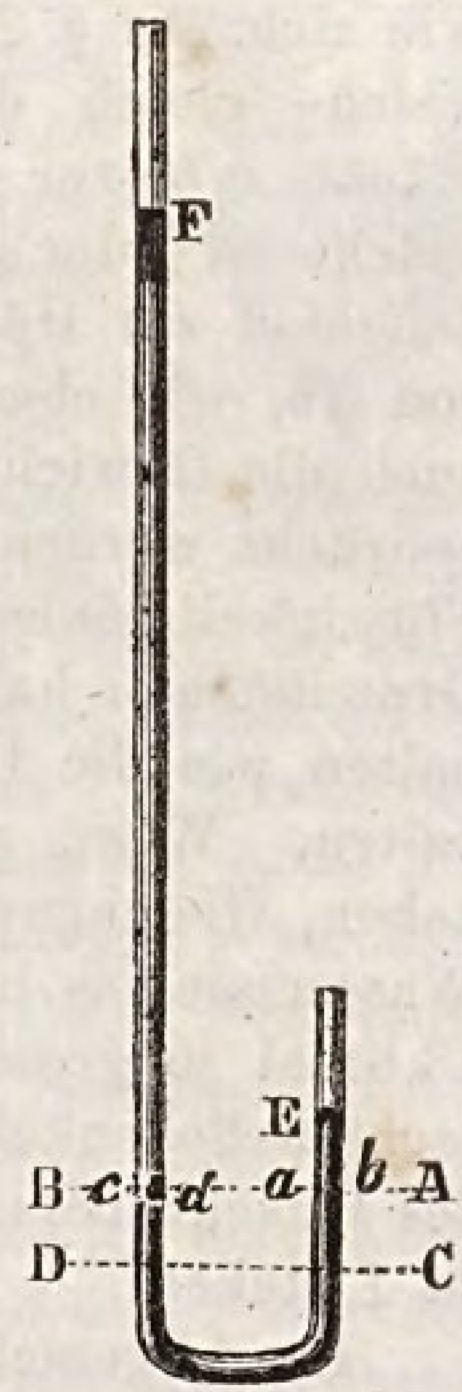


Fig. 408.

Denken wir uns zu diesem Behufe die Grenzfläche cd, wo sich die beiden Flüssigkeiten berühren, in die Horizontalebene A B

erweitert, so wird diese das Quecksilber in dem rechten Schenkel in der Fläche *ab* durchschneiden. Wenn Gleichgewicht vorhanden ist, so wird dieses nicht im Geringsten gestört, wenn wir uns bei *ab* eine feine Wand eingezogen denken; der Druck auf beide Seiten dieser Wand muss offenbar gleich gross sein. Nun ist der Druck, welcher von Seite des Quecksilbers in dem rechten Schenkel auf die Wand *ab* ausgeübt wird, gleich dem Gewicht einer Quecksilbersäule, welche diese Wand als Grundfläche und ihre Entfernung von der freien Oberfläche des Quecksilbers in diesem Schenkel zur Höhe hat. Um den Druck zu erhalten, der auf die untere Fläche der Wand *ab* von Seite des linken Schenkels her stattfindet, darf man nur überlegen, dass dieser Druck Null wäre, wenn man das über der Grenzfläche *cd* stehende Wasser entfernen würde. Der in Rede stehende Druck rührt also allein von dem Gewichte dieses Wassers her, und der Druck, welchen dasselbe auf die Fläche *cd* ausübt, ist gleich dem Gewicht einer Wassersäule, welche die Fläche *cd* als Basis und ihren vertikalen Abstand vom Wasserspiegel im linken Schenkel zur Höhe hat. Dieser Druck wird durch das Quecksilber hindurch auf die Wand *ab* gleichmässig fortgepflanzt und findet folglich, wie sich aus §. 266 leicht ergibt, daselbst mit einer Stärke statt, welche gleich dem Gewichte einer Wassersäule ist, die die Fläche *a b* zur Grundfläche und den vertikalen Abstand der Fläche *cd* (oder auch der Fläche *ab*) vom Wasserspiegel im linken Schenkel zur Höhe hat. Da die Drückungen auf beiden Seiten von *ab*, wie oben gesagt, einander gleich sein müssen, so müssen auch die Gewichte der Flüssigkeitssäulen, durch welche sie ausgedrückt werden, gleich gross sein. Nun enthalten aber diese Flüssigkeitssäulen verschiedene Flüssigkeiten, und da sie gleiche Grundflächen haben, so müssen sich ihre Höhen umgekehrt verhalten wie die Dichtigkeiten der in ihnen enthaltenen Flüssigkeiten. Wenn also in dem Falle, welchen wir vorausgesetzt haben, Gleichgewicht bestehen soll, so muss die Höhe des freien Wasserspiegels im linken Schenkel über der Horizontalebene AB 13,6 mal so gross sein als die Höhe des Quecksilberspiegels im rechten Schenkel über derselben Ebene, weil die Dichtigkeiten des Quecksilbers und des Wassers in dem Verhältniss von 13,6 zu 1 stehen.

Im Allgemeinen folgt aus dem Vorhergehenden, dass für das Gleichgewicht zweier verschiedener Flüssigkeiten in communicirenden Röhren erforderlich ist, dass die Höhen der freien Oberflächen dieser beiden

Flüssigkeiten über der Horizontalebene, welche durch ihre Grenzfläche hindurchgeht, umgekehrt proportional den Dichtigkeiten dieser Flüssigkeiten sind.

§. 286. **Flüssigkeiten, welche der Wirkung beliebiger Kräfte unterworfen sind.** — Wenn die Moleküle einer Flüssigkeit, ausser den Molekularkräften, die immer vorhanden sind, der Wirkung noch anderer Kräfte als der Schwere unterliegen, so sind die Umstände, unter denen das Gleichgewicht der Flüssigkeit stattfindet, verschieden von denjenigen, welche wir bisher gefunden haben. Die Drückungen ändern sich nicht mehr so, wenn man von einem Punkt der Flüssigkeitsmasse zu einem anderen übergeht und die freie Oberfläche der Flüssigkeit hat nicht mehr dieselbe Form, wie wir oben auseinander gesetzt haben. Wir wollen uns hier nur mit der Gestalt der freien Oberfläche beschäftigen und zusehen, welchen Bedingungen dieselbe zu genügen hat.

Es sei A (Fig. 409) ein Molekül, welches auf der freien Oberfläche der Flüssigkeit gelegen ist, auf welche beliebige Kräfte einwirken. Denken wir uns, man hätte die sämmtlichen Kräfte, welche auf dieses Molekül wirken, mit Einschluss der Schwerkraft, aber ohne die Molekularkräfte, mit welchen die benachbarten Moleküle auf es wirken, in eine einzige Mittelkraft zusammengefasst, die nach der Linie AB wirkt. Wenn dann der Theil der freien Oberfläche der Flüssigkeit, welche den Punkt A in nächster Nähe umgibt und welcher immer als eben vorausgesetzt werden darf, nicht senkrecht auf der Linie AB steht, so kann die Flüssigkeit nicht im Gleichgewicht sein. Denn damit dieses Gleichgewicht stattfindet, ist es nothwendig, dass die Kraft, von der wir eben gesprochen haben und welche nach der Linie AB wirkt, durch die Resultante der Molekularwirkungen, welchen das Molekül A unterliegt, aufgehoben werde. Diese Resultante der Molekularwirkungen ist aber stets nach der Senkrechten AC auf die freie Oberfläche der Flüssigkeit gerichtet (§. 276). Wenn man folglich die Kraft, welche nach AB wirkt, in eine Kraft nach AC und in eine andere Kraft senkrecht auf dieser ersteren zerlegt, so kann allein die nach AC wirkende Componente durch die Wirkung der Molekularkräfte aufgehoben werden; die andere Componente bewegt nothwendig das Molekül A der freien Oberfläche entlang, um es in eine andere Lage zu führen. Es

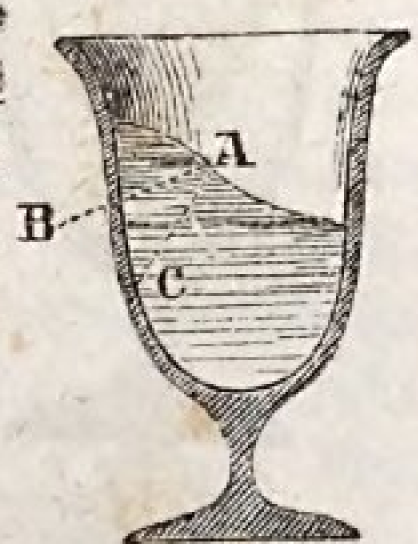


Fig. 409.

kann also das Gleichgewicht nicht stattfinden, so lange die Resultante der Kräfte, welchen jedes Molekül, das auf der freien Oberfläche der Flüssigkeit gelegen ist, unterliegt, nicht senkrecht auf diese Oberfläche gerichtet ist. Umgekehrt ist leicht einzusehen, dass das Gleichgewicht stattfinden muss, wenn diese Resultante senkrecht auf der freien Oberfläche steht; denn diese Resultante sucht das Molekül blos in das Innere der Flüssigkeitsmasse eindringen zu machen, sie ruft dadurch die Entwicklung gewisser Molekularkräfte hervor, die sich im Verein der Hervorbringung dieser Bewegung widersetzen, indem sie sich in eine an Grösse gleiche, aber entgegengesetzte Resultante vereinigen.

§. 287. Als Beispiel zur Anwendung des Vorhergehenden können wir ein Gefäss nehmen, das mit Wasser gefüllt ist und welchem eine gleichförmige Rotationsbewegung um seine vertikale Achse AB (Fig. 410) ertheilt wird. Eine solche Bewegung kann dem Gefässe, wie die Figur zeigt, mittelst einer Kurbel C und zweier Rollen D, E, um welche eine Schnur ohne Ende geschlungen ist, gegeben werden. Während der Bewegung ist jedes Molekül der Flüssigkeit einerseits der Wirkung seines Gewichtes, andererseits einer Centrifugalkraft unterworfen, welche horizontal gerichtet ist und es von der Achse AB zu entfernen sucht. Wenn man diese beiden Kräfte in eine einzige zusammensetzt, so findet man eine Resultante, die schief, d. h. weder vertikal noch horizontal gerichtet ist und in der Ebene liegt, welche durch die Achse AB hindurch geht. Damit also die Flüssigkeit im Gleichgewicht ist, kann ihre Oberfläche nicht mehr eben und horizontal bleiben, sondern sie muss eine solche Gestalt annehmen (s. die Figur), dass sie in jedem ihrer Punkte senkrecht auf der Resultante der beiden Kräfte steht, welche auf das Flüssigkeitsmolekül, das in diesem Punkte gelegen ist, einwirken. Die Oberfläche der Flüssigkeit

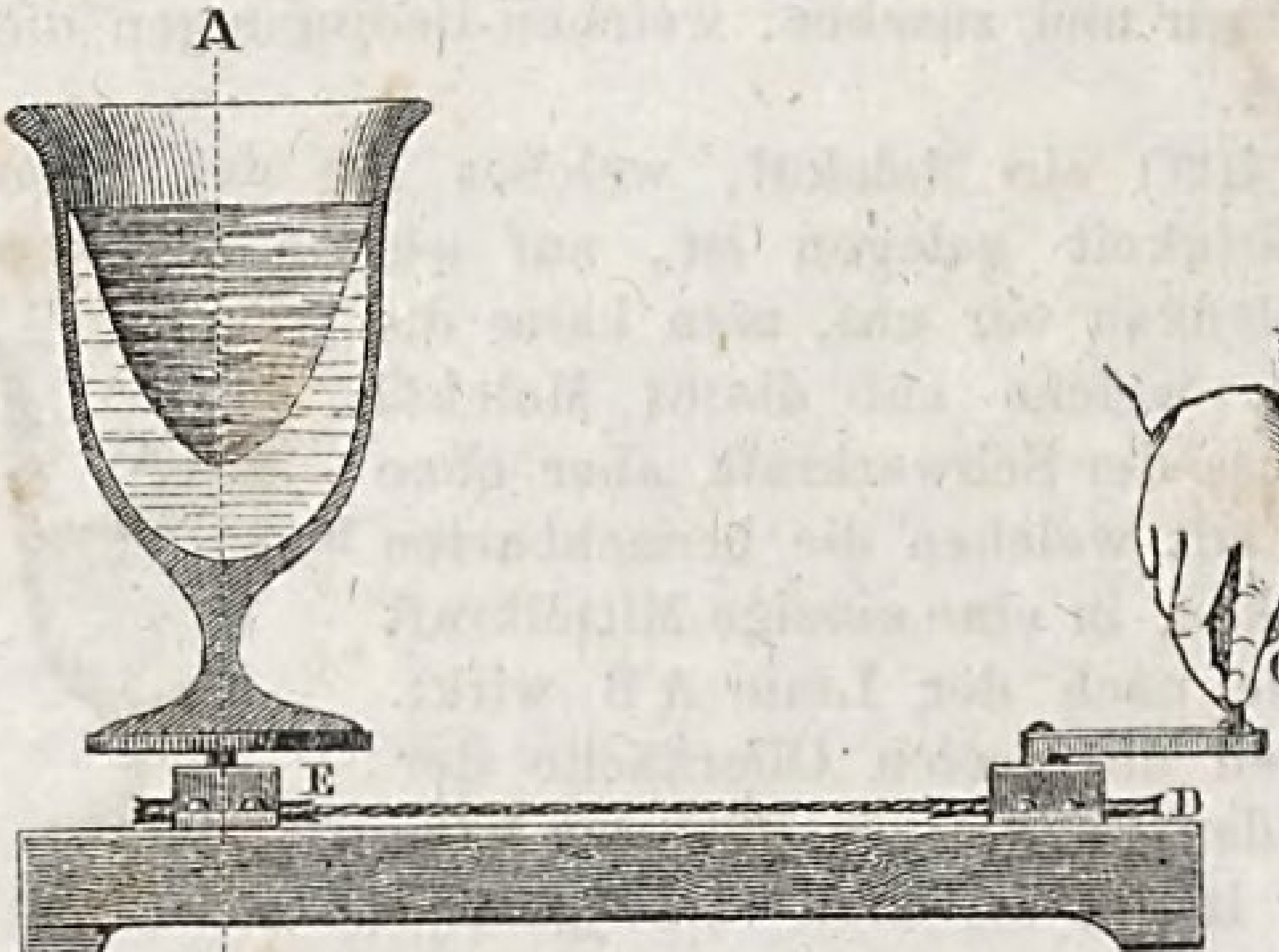


Fig. 410.

wird in Folge der Wirkung der Rotationsbewegung concav, und diese Concavität wird um so stärker, je schneller die Rotationsbewegung wird; die krumme Linie, nach welcher diese Oberfläche von irgend einer Ebene, die durch die Achse AB hindurch geht, geschnitten wird, hat die Form einer Parabel (§. 139).

§. 288. Die Gestalt, welche die Oberfläche der Erde im Grossen und Ganzen, wenn man von den Erhebungen und Vertiefungen des Bodens abstrahirt,*) zeigt, ist ein zweites sehr wichtiges Beispiel, welches man zur Anwendung des in §. 286 aufgestellten Gesetzes geben kann. Alles spricht dafür, dass sich die ganze Masse unserer Erde in einer sehr frühen Zeit im flüssigen und zwar im feurig flüssigen Zustande befunden habe, und dass sie erst mit der Zeit durch allmähliche Erkältung auf der Oberfläche erstarrt und so in den Zustand gekommen sei, in welchem wir sie kennen. Diese flüssige Masse, wenn sie keine Rotationsbewegung gehabt haben würde, hätte natürlich die Form einer Kugel annehmen müssen, da ihre verschiedenen Moleküle in Folge der zwischen ihnen wirkenden gegenseitigen Anziehungskraft sich einander so sehr als möglich zu nähern gesucht haben würden. Die Stoffe von verschiedener Dichtigkeit, aus denen die Erde besteht, würden sich in ihrem flüssigen Zustande regelmässig in concentrischen Kugelschalen um den Mittelpunkt dieser Kugel gelagert haben, und die Resultante aller Anziehungen, welche ein Molekül auf der Oberfläche derselben erfahren haben würde, hätte, wie leicht zu sehen, nothwendig senkrecht auf der Oberfläche der Kugel stehen und folglich durch den Mittelpunkt derselben gehen müssen. Aber die Rotationsbewegung der Erde um ihre Achse, d. h. um die Linie, welche man sich durch ihre Pole gelegt denkt, hat sie verhindert, diese Kugelgestalt anzunehmen. Man sieht in der That, dass eine solche Bewegung, in Folge deren jeder Punkt in 24 Stunden den Umfang eines Kreises durchläuft, in jedem Molekül A, das nicht auf der Rotationsachse PP' (Fig. 411) gelegen ist, eine Centrifugalkraft AB hervorrufen muss, welche in jedem Augenblick nach dem Halbmesser des Kreises gerichtet ist, den das Molekül A durchläuft. Diese Kraft setzt sich mit der Resultante AC der Anziehungen, welche das Molekül von Seite aller andern erfährt, zusammen und nöthigt so die Flüssigkeitsmasse, eine

*) Diese Abstraction wird sehr unterstützt, wenn man bedenkt, dass die Höhe der höchsten Berge der Erde kaum $^1/_{1500}$ des Durchmessers beträgt, sodass ein solcher Berg auf einer Kugel von einem Meter Durchmesser, welche die Erde repräsentirt, nur etwa durch ein Sandkorn dargestellt werden dürfte.

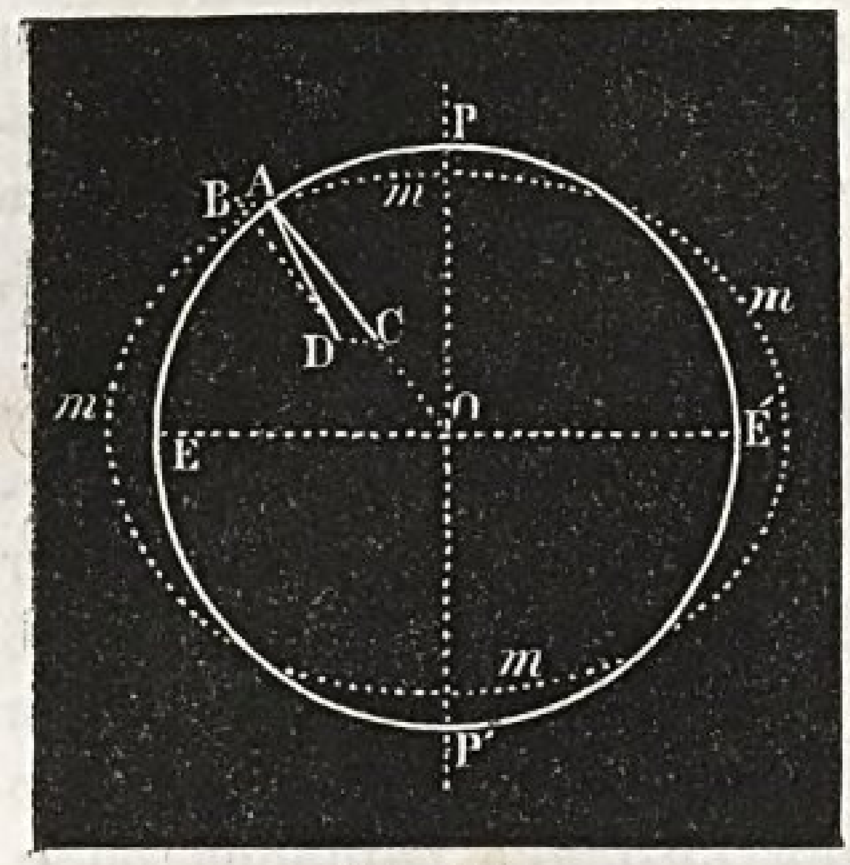


Fig. 411.

andere Gestalt anzunehmen, als wenn die Resultante AC allein wirken würde. Wenn die Oberfläche dieselbe wäre wie in dem Fall, wo die Rotationsbewegung nicht vorhanden ist, so würde die Kraft AC nach dem Mittelpunkt dieser Oberfläche gerichtet sein; die Resultante AD der beiden Kräfte AB und AC könnte daher diese Richtung nicht haben und würde folglich nicht senkrecht auf der freien Oberfläche der Flüssigkeit stehen, was, wie wir wissen, nicht der Fall sein kann. In Folge der Wirkung der Centrifugalkraft also, welche die Rotationsbewegung in den verschiedenen Molekülen, welche nicht in der Rotationsachse gelegen sind, entwickelt, wird die Oberfläche der flüssigen Masse gezwungen, sich an den Polen abzuplatten und dagegen in der Nähe des Aequators anzuschwellen und so die Form anzunehmen, wie sie die punktirte Linie *mm* in der Figur, in sehr übertriebener Weise gezeichnet, darstellt.

Indem die Oberfläche der Erde in Folge der Erkältung allmählich erstarrte, behielt die feste Rinde, welche auf diese Weise gebildet wurde, im Ganzen die abgeplattete Gestalt, welche die Oberfläche angenommen hatte, als sie sich noch im flüssigen Zustande befand. Was das Meer betrifft, welches einen grossen Theil der Erdoberfläche bedeckt, so befindet es sich jetzt noch unter denselben Umständen, wie die flüssige Masse, aus welcher ursprünglich die ganze Erdkugel bestand; es ist daher an den Polen abgeplattet, während es sich gegen den Aequator hin mehr und mehr erhebt. Wenn die Erde aufhören würde, sich um ihre Achse zu drehen und ihre feste Rinde in ihrer Gestalt dadurch nicht mehr geändert würde, so würden sich doch die Wasser des Meeres von dem Aequator zurückziehen und um die Pole her anhäufen, um die Kugelgestalt wenigstens annähernd wieder herzustellen.

In Folge der Abplattung der Erde an den Polen ist der Durchmesser derselben zwischen den letzteren um ungefähr $^1/_{300}$ kleiner als der am Aequator. Demnach ist ein Punkt der Erdoberfläche unter dem Aequator um $^1/_{300}$ des mittleren Halbmessers der Erde weiter von dem Mittelpunkt derselben entfernt als ein solcher unter den Polen, d. h. also um eine Grösse, welche mehr als doppelt soviel als die Höhe der höchsten Berge der Erde beträgt.

§. **289.** Die Vertikale, deren Richtung durch das Bleiloth (§. 20) bestimmt wird, ist die Linie, nach welcher die Kraft auf den Körper wirkt, welche wir das Gewicht dieses Körpers genannt haben. Diese Kraft ist die Resultante der Anziehungen, welche alle Moleküle der Erde auf den Körper ausüben, und der Centrifugalkraft, welche durch die Rotationsbewegung der Erde entwickelt wird. Es folgt aus dem, was wir im §. 286 gesagt haben, dass das Bleiloth in jedem Punkt der Oberfläche einer ruhig stehenden Wassermasse senkrecht auf dieser Oberfläche stehen muss. Wenn wir oben gesagt haben, dass die freie Oberfläche einer schweren im Gleichgewicht befindlichen Flüssigkeit eben und horizontal sei (§§. 275 u. 276), so haben wir dabei stillschweigend vorausgesetzt, dass die Vertikalen, welche durch die verschiedenen Punkte dieser Oberfläche gezogen werden, als unter sich parallel betrachtet werden können. Dies kann in der That auch ohne merklichen Fehler geschehen, so lange jene Oberfläche keine grosse Ausdehnung besitzt, wie es bei unseren Gefässen stets der Fall ist. Wenn dagegen die Oberfläche der Flüssigkeit zu gross wird, sodass man die Vertikalen, welche durch ihre verschiedenen Punkte gezogen werden, nicht mehr als parallel annehmen kann, so kann man auch nicht mehr sagen, dass diese Oberfläche eben sei, sondern man wird nur finden, dass sie durchweg senkrecht auf der Vertikalen steht. Die Oberfläche eines grösseren See's zeigt sehr merkbar die Krümmung, welche sie besitzt.

Wir haben bisher die Anziehung, welche der Mond und die Sonne auf die Erde ausüben, unbeachtet gelassen. Aber diese Anziehung hat gleichfalls Einfluss auf die Grösse und Richtung der Resultante der gesammten Wirkungen, welche ein Molekül an der Oberfläche der Erde überhaupt und insbesondere ein solches an der Oberfläche des Meeres erleidet. Sprechen wir zunächst blos von der Anziehung des Mondes, als der bei weitem grösseren von beiden, so hat diese die Wirkung, dass sich das Meer an der dem Monde zugekehrten Seite sowohl, wie auch auf der entgegengesetzten erhebt, auf den anderen dagegen senkt. In Folge der Achsendrehung der Erde schreiten diese Hebungen und Senkungen in ungefähr 25 Stunden um die ganze Erde herum fort, sodass an einem bestimmten Punkt des Meeres oder dessen Ufern in ungefähr 25 Stunden zweimal Hebung und zweimal Senkung der Meeresfläche stattfindet. Dies ist die Erscheinung der E b b e u n d F l u t h. Ganz ähnlich wie der Einfluss des Mondes ist derjenige der Sonne, nur ist der letztere wegen der

viel grösseren Entfernung der Sonne von der Erde bedeutend kleiner; er vermischt sich natürlich mit dem Einfluss des Mondes denselben bald vergrössernd, bald verkleinernd. Zur Zeit des Neumonds und Vollmonds, wo Sonne und Mond auf derselben oder auf gerade entgegengesetzter Seite der Erde stehen, unterstützen sich dieselben in ihrer Wirkung gegenseitig, und dann sind die Fluthen am höchsten; beim ersten und letzten Viertel dagegen finden die Wirkungen der Sonne und des Mondes in entgegengesetztem Sinne statt: die Fluthen sind daher weniger hoch.

Bei kleineren Wassermassen, wie sie in Gefässen und selbst noch in grösseren Seeen enthalten sind, macht sich der Einfluss der Sonne und des Mondes natürlich gleichfalls geltend, und zwar in periodischen Neigungen der Oberfläche bald auf die eine, bald auf die andere Seite. Aber diese Neigungen sind so ungemein schwach, dass sie ganz unmerklich werden.

§. 290. **Kapillarerscheinungen.** — Wenn man die Oberfläche des Wassers in einem Gefäss aufmerksam betrachtet, so erkennt man leicht, dass diese Oberfläche allerdings fast in ihrer ganzen Ausdehnung eben ist, dass sie sich aber in der Nähe der Wand in sehr bemerkbarer Weise erhebt. Sehen wir, welches die Ursache dieser Erscheinung ist, die im Widerspruch mit dem zu stehen scheint, was wir oben über die freie Oberfläche einer schweren Flüssigkeit gesagt haben.

Als wir oben (§. 276) zeigten, dass die freie Oberfläche einer schweren Flüssigkeit eben und horizontal sein muss, haben wir vorausgesetzt, dass die Resultante der Wirkungen, welche ein Molekül, das auf der Oberfläche der Flüssigkeit gelegen ist, seitens der benachbarten Moleküle erfährt, senkrecht auf diese Oberfläche gerichtet ist. Aber dies ist nur richtig, so lange dieses Molekül nicht zu nahe an der Wand des Gefässes liegt, welches die Flüssigkeit enthält, und die Resultate, welche wir oben erhalten haben, gelten folglich nur für solche Punkte der Oberfläche, welche dieser Bedingung genügen.

Sehen wir nun, in welcher Weise die Wände des Gefässes auf die Form der freien Oberfläche der Flüssigkeit Einfluss ausüben. Zu diesem Behufe setzen wir zunächst voraus, dass die Flüssigkeitsoberfläche bis zur Wand hin eben und horizontal sei (Fig. 346) und untersuchen nun, ob die Flüssigkeit im Gleichgewicht sein kann, wenn ihre Oberfläche diese Gestalt beibehält. Es sei A ein Molekül in der Oberfläche der Flüssigkeit, ganz nahe an der Wand des Gefässes gelegen. Beschreiben wir um den

Punkt A, wie um einen Mittelpunkt, eine Kugelfläche so, dass alle die Moleküle, welche noch eine Wirkung auf das in A gelegene Molekül ausüben können, innerhalb dieser Kugelfläche gelegen seien. Man nennt diese Kugel, deren Halbmesser, nebenbei gesagt, nur eine sehr geringe Grösse hat, die Wirkungssphäre des Moleküls A.

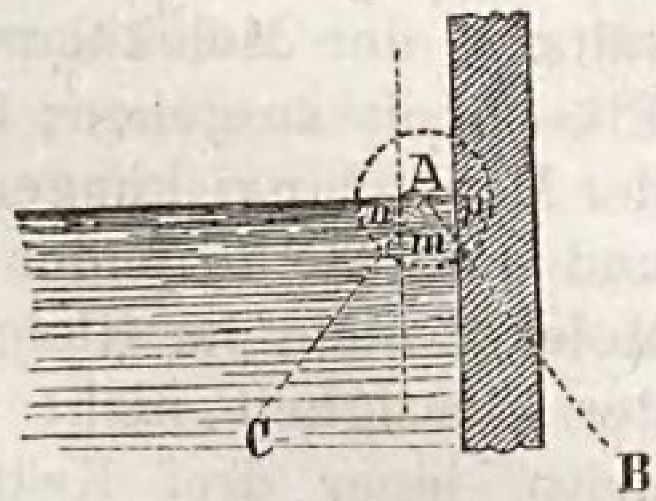


Fig. 412.

Wenn dieselbe nur Flüssigkeitsmoleküle enthält, so kann man sagen, wie wir es oben (§. 276) gethan haben, dass wegen der symmetrischen Anordnung die Resultante der Molekularwirkungen, welche auf das Molekül A ausgeübt werden, senkrecht zur Oberfläche der Flüssigkeit in diesem Punkte gerichtet ist. Aber wenn das Molekül A sehr nahe der Wand liegt, so dringt seine Wirkungssphäre noch in die Materie, aus welcher die Wand besteht, ein, sodass es zu gleicher Zeit den Wirkungen, welche von den Flüssigkeitsmolekülen, und den Wirkungen, welche von denjenigen Molekülen der festen Wand, die in der Wirkungssphäre enthalten sind, herrühren, unterworfen ist. Die Symmetrie der Anordnung besteht also nicht mehr, und man kann nicht mehr sagen, dass die Resultante sämmtlicher Molekularwirkungen auf den Punkt A senkrecht auf die als horizontal vorausgesetzte Oberfläche der Flüssigkeit, d. h. also vertikal gerichtet sei.

Nehmen wir der Einfachheit halber an, dass der Theil der Wand, welcher in der Wirkungssphäre des Punktes A gelegen ist, an der Seite, wo er von der Flüssigkeit bespült wird, eben und vertikal sei. Denken wir uns ferner, dass links von dem Punkte A, parallel zu der Wandfläche, von der wir eben gesprochen haben, und in derselben Entfernung von dem Punkte A wie diese gelegen, eine Vertikalebene durch die Flüssigkeit gelegt werde. Auf diese Weise wird die im Innern der Wirkungssphäre des Punktes A gelegene Flüssigkeit in zwei Theile m und n getheilt. Die Molekularwirkungen, welche von dem Theil m der Flüssigkeit ausgehen, geben offenbar eine vertikale Resultante; aber der Theil n der Flüssigkeit und der Theil p der Wand, welche ebenfalls auf das Molekül A wirken, bringen eine Resultante hervor, welche im Allgemeinen eine schiefe Richtung haben wird, und man begreift, dass je nach der Natur der Flüssigkeit und der Wand diese Resultante bald nach AB bald nach AC gerichtet sein wird. In dem einen wie in dem anderen Fall ist also das Molekül A folgenden Kräften unterworfen: 1) seinem

Gewicht, welches vertikal abwärts wirkt; 2) der vertikalen Resultante der Molekularwirkungen, welche von dem Theil *m* der Flüssigkeit ausgehen; 3) der im Allgemeinen schiefen Resultante der Molekularwirkungen, welche von dem Theile *n* der Flüssigkeit und dem Theile *p* der Wand herrühren. Es kann daher dieses Molekül nicht im Gleichgewicht sein und folglich die Oberfläche der Flüssigkeit nicht eben und horizontal bleiben. Wenn die dritte jener drei Kräfte nach AB gerichtet ist, so wird das Molekül A gegen die Wand hin gezogen; die Flüssigkeit muss sich also in der Nachbarschaft dieser Wand anhäufen, und ihre Oberfläche muss sich in der Nähe derselben erheben und die Form annehmen, wie es Fig. 413 zeigt. Wenn diese dritte Kraft dagegen nach AC gerichtet ist, so entfernt sich das Molekül A von der Wand, die Flüssigkeit scheint von derselben abgestossen zu werden, und ihre Oberfläche senkt sich daher, um die Form anzunehmen, wie es Fig. 414 zeigt. In beiden Fällen findet nicht eher Gleichgewicht statt, als bis die Oberfläche der Flüssigkeit in der Nähe der Wand in jedem Punkt senkrecht auf der Resultante jener drei Kräfte steht.

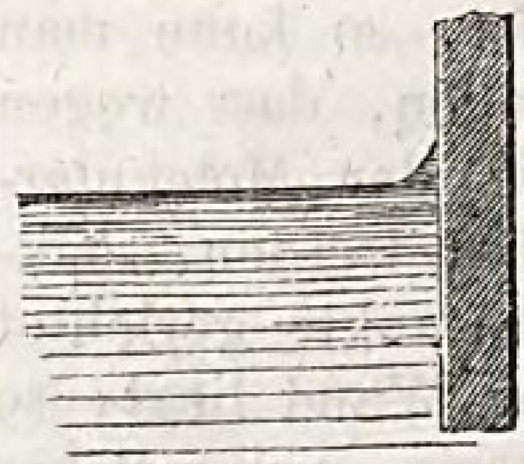


Fig. 413.

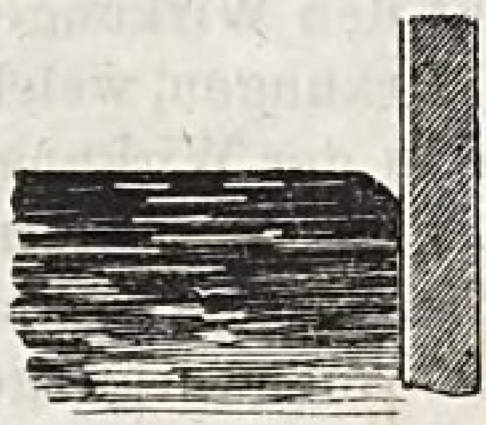


Fig. 414.

Es ist nicht schwer zu bestimmen, wann der eine und wann der andere von diesen beiden Fällen eintreten wird. Denken wir uns zu diesem Behufe das Molekül A (Fig. 415) der Oberfläche der Flüssigkeit dicht an der inneren Fläche der Wand gelegen, die wir wieder als eben und vertikal voraussetzen. Dann wird die Wirkungssphäre dieses Moleküls durch die innere Fläche der Wand in zwei Halbkugeln getheilt, von denen die eine nur Flüssigkeitsmoleküle, die andere nur Moleküle der festen Wand enthält. Der Theil *m* in Fig. 346 wird hier offenbar gleich Null. Wenn das Molekül A nicht in der Oberfläche der Flüssigkeit gelegen wäre, wenn sich diese z. B. in MN befände, so würden sämmtliche Flüssigkeitsmoleküle der linken Halbkugel der Wirkungssphäre auf A einwirken, und die Resultante dieser Einwirkungen A*a* würde senkrecht zur Wand gerichtet sein. Diese Resultante könnte offenbar in zwei Seitenkräfte A*b* und A*c* von

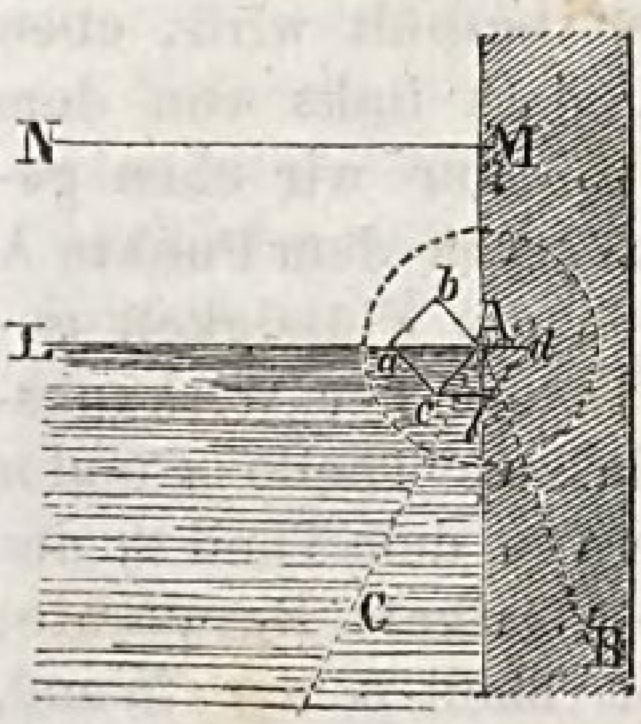


Fig. 415.

gleicher Grösse zerlegt werden, deren Richtungen bezüglich die Quadranten MAL und LAf halbiren, und welche offenbar die Mittelkräfte der Einwirkungen der Flüssigkeitsmoleküle vorstellen würden, welche in der beziehungsweise über und unter der Horizontalebene AL befindlichen Hälfte der in Rede stehenden Halbkugel gelegen sind. Wenn daher A in der Oberfläche AL der Flüssigkeit liegt, so fällt die Componente Ab ganz weg, und es bleibt allein die Ac als Gesammtwirkung der Flüssigkeit auf das Theilchen A übrig. Die sämmtlichen Wirkungen, welche das Molekül A von Seite der Wand erfährt, lassen sich offenbar in eine Resultante Ad zusammenfassen, die senkrecht zur Wandfläche gerichtet ist. Auf das Molekül A wirken folglich jetzt zwei Kräfte: 1) sein Gewicht, vertikal abwärts, und 2) die Mittelkraft der beiden Kräfte Ac und Ad, welche, je nachdem sie nach AB oder AC gerichtet ist, wie vorhin schon gesagt, eine Erhebung oder eine Senkung der Flüssigkeit in der Nähe der Wand hervorruft. Die Grenze zwischen diesen Fällen bildet der, wo auch die Resultante der Kräfte Ac und Ad nach der Vertikalen gerichtet ist, wo also die Flüssigkeit auch in der Nähe der Wand noch horizontal bleibt. Wir haben diesen Fall in unserer Figur vorausgesetzt. Es ist leicht zu sehen, dass Ad halb so gross als Aa sein muss, damit die Mittelkraft Af von Ac und Ad in der Richtung der Vertikalen gelegen ist. Wenn Ad grösser als die Hälfte von Aa ist, so wird jene Mittelkraft mehr nach rechts, nach AB, und wenn Ad dagegen kleiner als das halbe Aa ist, mehr nach links, nach AC, gerichtet sein. Wir wollen die Kräfte Aa und Ad, die Resultanten der sämmtlichen Molekularwirkungen, welche das Flüssigkeitsmolekül A von je einer Hälfte seiner Wirkungssphäre zu erleiden hat, wenn dieselbe in einem Fall mit Flüssigkeitsmolekülen, im anderen Fall mit Molekülen der festen Wand erfüllt ist, die Gesammtanziehungen nennen, welche das Molekül A beziehungsweise von der Flüssigkeit und von der Wand erfährt. Dann folgt aus dem Obigen:

1) Die Oberfläche der Flüssigkeit, welche in einem Gefäss enthalten ist, wird sich in der Nähe der Wände des Gefässes erheben und die in Fig. 413 dargestellte Form annehmen, wenn die Gesammtanziehung, welche ein in nächster Nähe der Wand gelegenes Flüssigkeitstheilchen von Seite der Wand erfährt, grösser ist als die Hälfte der Gesammtanziehung, welche auf dasselbe Theilchen von Seite der Flüssigkeit ausgeübt wird. Dieser Fall tritt z. B. ein, wenn Wasser in ein reines Glasgefäss gegossen wird.

2) Die Oberfläche der Flüssigkeit wird sich dagegen in der Nähe der Wand herabsenken und die in Fig. 414 dargestellte Form annehmen, wenn die Gesammtanziehung, welche ein Flüssigkeitstheilchen von Seite der Wand erfährt, kleiner als die Hälfte der Gesammtanziehung ist, welche auf dasselbe Flüssigkeitstheilchen von Seite der Flüssigkeit ausgeübt wird. Dieser Fall tritt z. B. ein, wenn Quecksilber in ein Glasgefäss gegossen wird.

3) Wenn die Gesammtanziehung, welche ein Flüssigkeitstheilchen von Seite der Wand erfährt, gleich der Hälfte der Gesammtanziehung von Seiten der Flüssigkeit auf dasselbe Theilchen ist, so ist die Oberfläche der Flüssigkeit auch in der Nähe der Wand noch eben und horizontal.

Wenn eine Flüssigkeit mit der Oberfläche eines Körpers, kürzer gesagt, mit einer Wand in Berührung kommt, so benetzt sie dieselbe entweder, wie es bei der Berührung von Wasser mit Glas stattfindet, oder es geschieht dies nicht, wie bei der Berührung von Quecksilber und Glas. Im ersteren Fall ist offenbar die Gesammtanziehung, welche ein zunächst der Wand gelegenes Flüssigkeitstheilchen von Seite dieser Wand erfährt, grösser als die Gesammtanziehung von Seite der Flüssigkeit auf dasselbe, im zweiten dagegen kleiner. Vergleicht man dies mit obigen Resultaten, so folgt, dass eine Flüssigkeit die Wand eines Gefässes nicht benetzen und doch an dieser Wand hinaufgezogen werden kann (Fig. 413). Es darf nur die Gesammtanziehung auf ein Flüssigkeitstheilchen von Seite der Wand kleiner als die ganze, aber doch grösser als die halbe Gesammtanziehung desselben Theilchens von Seite der Flüssigkeit sein. Andererseits freilich wird immer eine Senkung der Flüssigkeit in der Nähe der Gefässwand eintreten (Fig. 414), wenn sie diese Wand nicht benetzt.

Wir haben oben vorausgesetzt, dass das Gefäss weit sei. Dann ist die Oberfläche jeder in demselben enthaltenen Flüssigkeit in einiger Entfernung von den Wänden stets eben und horizontal. Wenn aber das Gefäss enger wird, wenn seine Weite nicht mehr als 1 Centimeter etwa beträgt, dann verschwindet der horizontale Theil in der Mitte der Oberfläche vollständig. In einer Glasröhre dieser Art bildet Wasser eine durchweg concave Oberfläche (Fig. 416), Quecksilber dagegen eine convexe Kuppe (Fig. 417).

§. 291. Wenn man die unteren Theile zweier Glasstreifen A und B (Fig. 418), deren Seitenflächen vertikal und zu einander parallel gerichtet sind, in Wasser taucht, so erhebt sich, entsprechend dem, was wir oben gesagt haben, das Wasser zu beiden Seiten jedes dieser Streifen; wenn die Streifen weit genug von

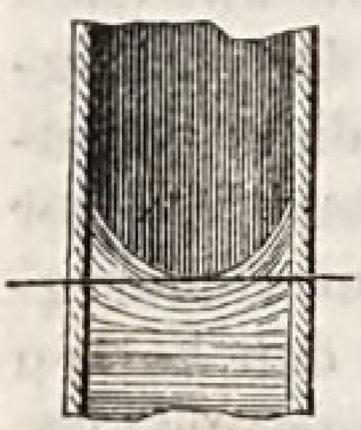


Fig. 416.

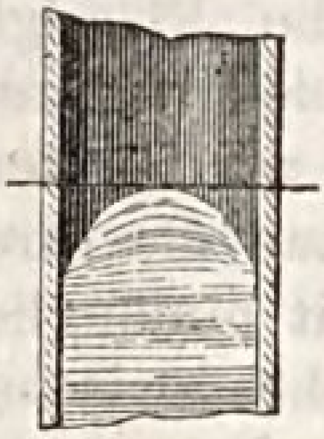


Fig. 417.

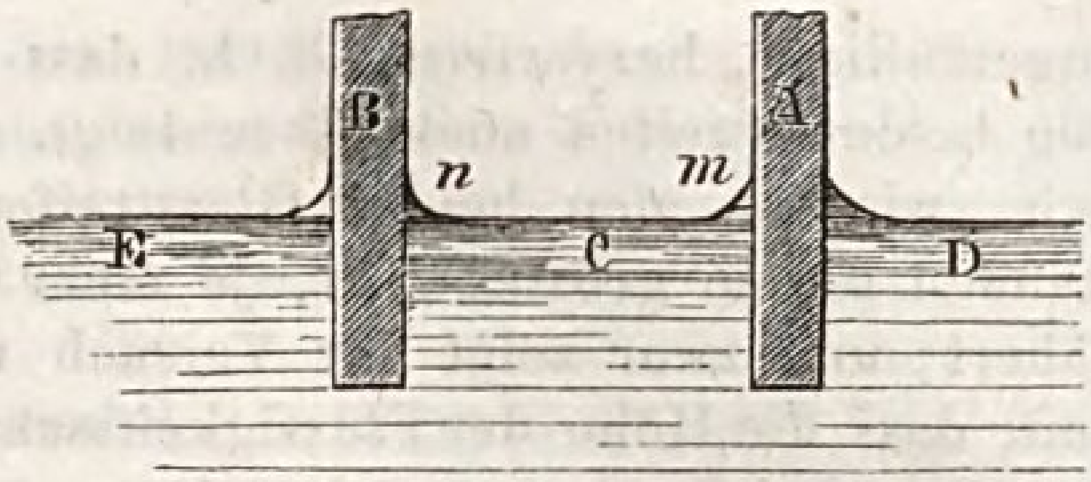


Fig. 418.

einander entfernt sind, so erfährt die Form, welche die Oberfläche der Flüssigkeit in der Nähe eines von ihnen annimmt, keinerlei Einfluss durch die Gegenwart des anderen; die Oberfläche der Flüssigkeit ist zwischen den beiden erhobenen Theilen *m* und *n* in C eben und horizontal und befindet sich in derselben Höhe wie die anderen Theile D und E der Oberfläche, welche ausserhalb der beiden Streifen gelegen sind. Wenn aber durch irgend eine Ursache die Oberfläche in C gehoben wird, so steigt die Flüssigkeit in *m* und *n* in Folge dessen ebenfalls. Dies findet aber statt, wenn man die beiden Glasstreifen einander so weit nähert (Fig. 419), dass kein Theil der Oberfläche bei C mehr eben bleibt. Dann endigt sich der gehobene Theil *m* unten in einen Theil der Oberfläche, welcher schon durch die Wirkung des Streifens B gehoben ist; er erhebt sich also höher als da, wo er an die horizontale Oberfläche angrenzte, die sich vorhin

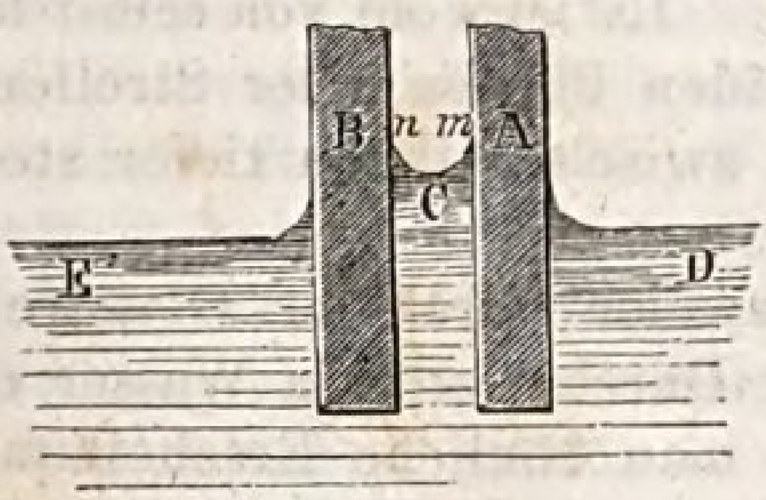


Fig. 419.

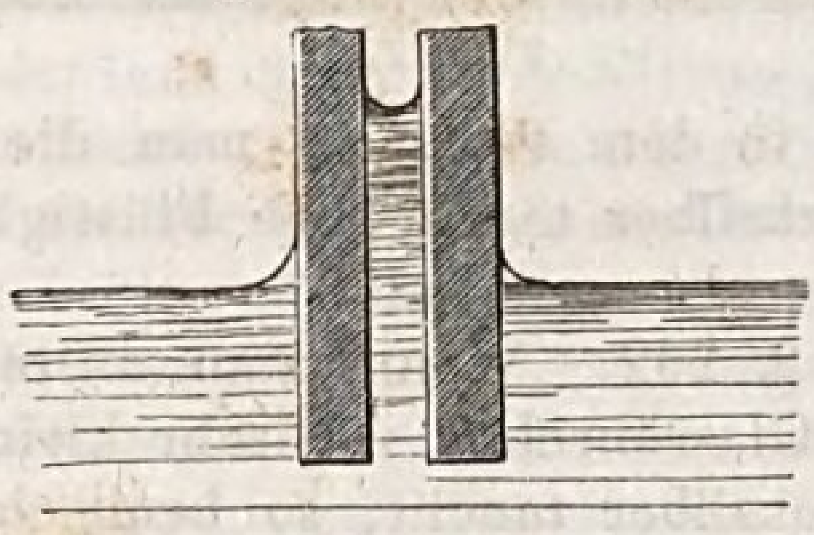


Fig. 420.

zwischen den beiden Streifen in C ausdehnte. Ebenso erhebt sich in Folge der Gegenwart des gehobenen Theils *m* der Theil *n* höher, als wenn jener nicht vorhanden wäre. Auf diese Weise wirken die beiden Erhebungen *m* und *n* gegenseitig auf einander ein und halten sich dadurch gegenseitig in grösserer Höhe, als wenn die beiden Glasstreifen weiter von einander entfernt sind; der tiefste Punkt C der Flüssigkeitsoberfläche zwischen diesen Streifen wird folglich höher als die beiden äusseren Spiegel D und E gelegen sein. Es versteht sich von selbst, dass, wenn man die beiden Glasplatten einander noch mehr nähert (Fig. 420), die Erscheinung, von der wir sprechen, noch

augenfälliger hervortritt, d. h. dass die Flüssigkeit zwischen den beiden Streifen noch höher steigt. Die Erhebung der Flüssigkeit zwischen den beiden Glasstreifen wird unter diesen Umständen um so grösser sein, je mehr man die Streifen einander nähert; und zwar zeigt der Versuch mit hinlänglicher Genauigkeit, dass die Höhe der Flüssigkeitsschichte zwischen den beiden Streifen der Entfernung derselben umgekehrt proportional ist. Dies zeigt sich auch, wenn man zwei Glasplatten, beide vertikal, so in Wasser taucht, dass sie sich mit dem einen Paar ihrer vertikalen Seitenlinien berühren, während sie nach dem anderen Paar hin etwas auseinander laufen und auf diese Weise einen sehr spitzen Winkel mit einander bilden (Fig. 421); man sieht alsdann die Flüssigkeit zwischen den Platten in dem Winkelraum, welchen sie bilden, in die Höhe steigen, und zwar um so höher, je näher sie der Kante ist, wo sich die beiden Platten berühren, d. h. je enger der Zwischenraum ist, welchen diese zwischen sich lassen. Die Form der dadurch gebildeten Curve ist die einer gleichseitigen Hyperbel.

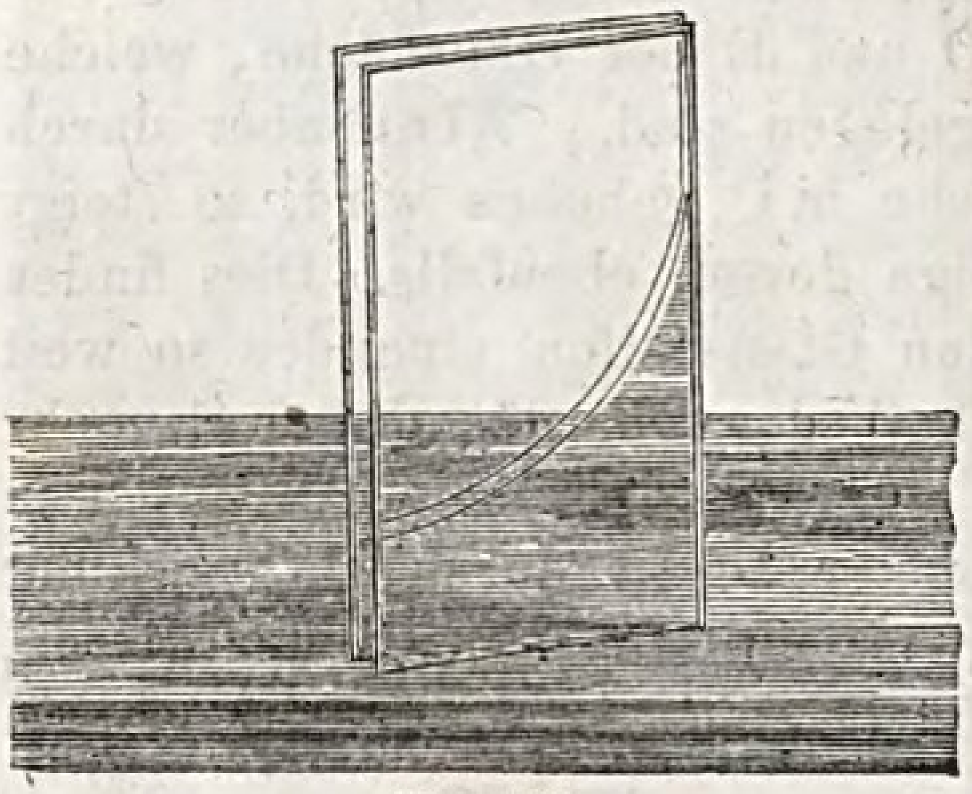


Fig. 421.

Es ist wohl von selbst klar, dass in dem Fall, wo man die beiden Platten oder Streifen in Quecksilber taucht, die Flüssigkeit zwischen ihnen tiefer stehen muss, als ausserhalb.

§. 292. Wenn man anstatt zweier paralleler Glasstreifen ein Glasröhrchen von sehr kleinem Durchmesser in Wasser oder Quecksilber taucht, so beobachtet man ähnliche Erscheinungen wie bei jenen, die auch auf dieselbe Weise wie dort erklärt werden können. Das Wasser hebt sich in dem Röhrchen über das Niveau der Flüssigkeit ausserhalb desselben (Fig. 422), und zwar um so höher, je enger das Röhrchen ist. Dabei ist seine Oberfläche im Röhrchen stets concav. Das Quecksilber dagegen steht im Röhrchen tiefer als ausserhalb desselben (Fig. 423), und zwar wieder um so tiefer, je enger das Röhrchen ist; seine Oberfläche ist immer convex. Der Versuch zeigt auch hier, dass die Hebung oder Senkung einer

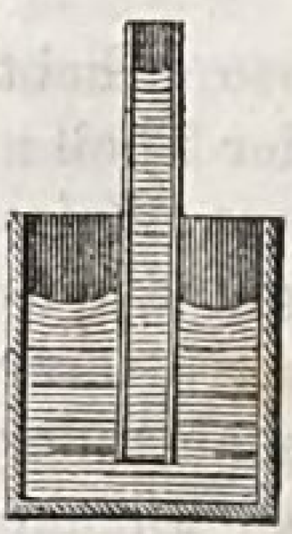


Fig. 422.

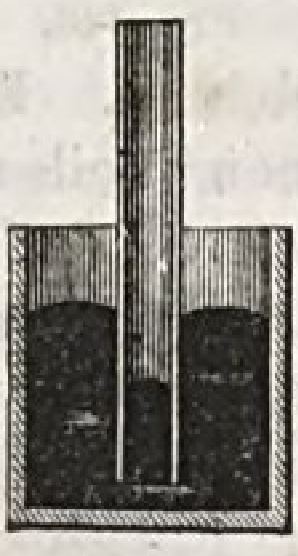


Fig. 423.

und derselben Flüssigkeit dem Durchmesser des Röhrchens umgekehrt proportional ist; ausserdem steht die Flüssigkeit in einem Röhrchen doppelt so hoch oder tief als zwischen zwei Platten, die um den Durchmesser des Röhrchens von einander entfernt sind.

Wenn man zwei communicirende Gefässe A und B (Fig. 424) nimmt, von denen das eine A eine Röhre von sehr kleinem Durchmesser ist, so steigt das Wasser, welches man in das Gefäss B giesst, in der Röhre A bis zu einem Punkt, der sehr bedeutend über der freien Oberfläche der Flüssigkeit im Gefäss B gelegen ist; nach dem Gesetz der communicirenden Gefässe (§. 284) müssten beide Oberflächen in A und B gleich hoch stehen, wenn die Wände, mit denen die Flüssigkeit in Berührung ist, dieses Resultat nicht modificiren würden.

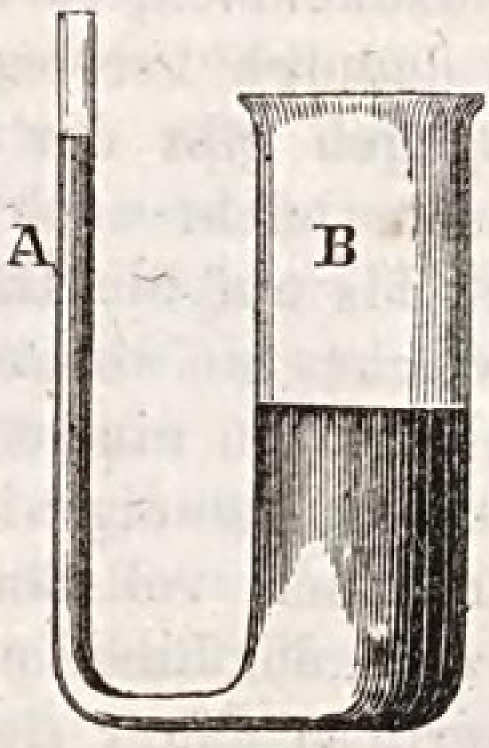


Fig. 424.

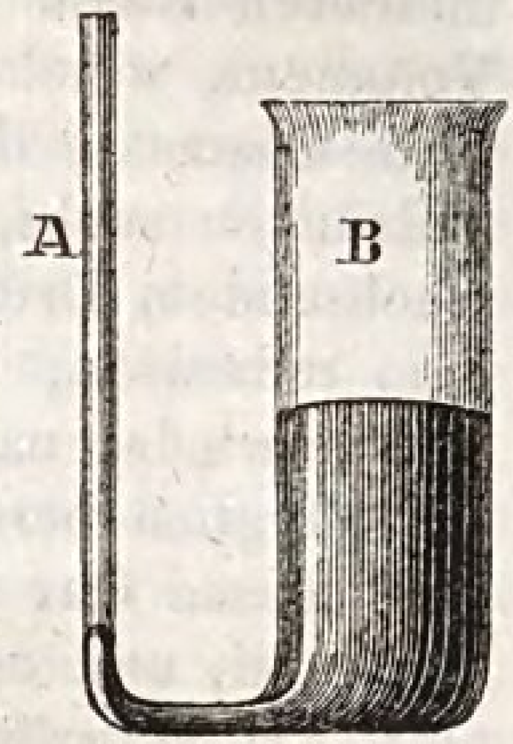


Fig. 425.

Eine ähnliche, aber umgekehrte Erscheinung zeigt sich, wenn man in dieselben communicirenden Gefässe Quecksilber eingiesst (Fig. 425). Die Oberfläche des Quecksilbers bleibt in der engeren Röhre A sehr bedeutend unter dem Niveau derselben Flüssigkeit im Gefäss B, während diese beiden Oberflächen ohne die in Rede stehende Wirkung nach dem oben angeführten Gesetz in beiden Gefässen gleich hoch stehen sollten.

Man nennt die Röhrchen von sehr kleinem Durchmesser, in welchen sich die eben besprochenen Hebungen und Senkungen der Flüssigkeiten, welche im Widerspruch mit den Gesetzen des Gleichgewichts der Flüssigkeiten zu stehen scheinen, erzeugen, Haar- oder Kapillarröhrchen. Von ihnen haben die gesammten Erscheinungen, mit denen wir uns oben beschäftigt haben, den Namen Haarröhrchen- oder Kapillar-Erscheinungen erhalten, und zwar nennt man gewöhnlich diejenigen dieser Erscheinungen, die den zwischen Wasser und Glas stattfindenden ähnlich sind, Erscheinungen der Kapillar-Attraction, während diejenigen, für welche uns das Verhalten des Quecksilbers zum Glas als Beispiel gedient hat, Erscheinungen der Kapillar-Depression heissen. Diese Kapillarerscheinungen spielen in der Natur eine sehr grosse Rolle; um ein Beispiel dafür anzuführen, reicht es hin, wenn wir sagen, dass das Aufsteigen

der Säfte in den Pflanzen hauptsächlich der Kapillarität der feinen Gefässe derselben zuzuschreiben ist.

§. 293. **Fortpflanzung des Drucks in den Gasen.** Die Gase haben mit den tropfbar flüssigen Körpern eine Eigenschaft gemeinschaftlich: das ist die leichte Verschiebbarkeit ihrer Theilchen gegen einander; aber sie unterscheiden sich auf der anderen Seite wesentlich von denselben. Eine Flüssigkeitsmasse ist beinahe vollständig unzusammendrückbar; wie gross auch der Druck ist, den man anwendet, um dieselbe zu veranlassen, einen kleineren Raum einzunehmen, so ist doch die Verminderung des Volumens, welche dadurch hervorgebracht wird, kaum merkbar. Eine Gasmasse dagegen gibt der Kraft, welche sie zusammenzudrücken sucht, sehr leicht nach; ihr Volumen lässt sich unter wachsendem Druck bis auf die Hälfte, das Drittel, Viertel von dem reduciren, welches sie vorher einnahm. Und wenn dieser Druck wieder nachlässt, so nimmt das Gas das Volumen, das es ursprünglich besass, vollständig wieder ein. Ja noch mehr, wenn eine Masse Gas in einem vollständig geschlossenen Gefäss enthalten ist, und es wird der Rauminhalt dieses Gefässes auf irgend eine Art vergrössert, so dehnt sich das Gas alsbald aus, um den ganzen Raum, welcher sich ihm darbietet, vollständig auszufüllen.

In Folge der leichten Verschiebbarkeit ihrer Moleküle, der Eigenschaft, welche die Gase mit den tropfbarflüssigen Körpern gemein haben, gelten die meisten Resultate, zu welchen wir oben bezüglich der Drückungen in den Flüssigkeiten gelangt sind, auch für die luftförmigen Körper. Aber in Folge der Zusammendrückbarkeit und Elasticität der Gase müssen mehrere dieser Gesetze etwas modificirt werden, um sie auf dieselben anwenden zu können. Wir wollen diese Gesetze der Reihe nach durchgehen, um anzugeben, worin diese Modificationen bestehen.

Betrachten wir zunächst eine Gasmasse, welche in einem völlig geschlossenen Gefäss enthalten ist und deren verschiedene Moleküle keiner andern Kraft als den Einwirkungen, welche sie selbst gegenseitig auf einander ausüben, unterworfen sind. Eine solche Gasmasse befindet sich offenbar unter denselben Umständen, wie die Flüssigkeit, mit der wir uns in den §§. 263 bis 267 beschäftigt haben; es genügt, in den Betrachtungen, welche wir dort anstellten, einen einzigen Unterschied zu berücksichtigen, um sie unmittelbar auf unsere Gasmasse übertragen zu können. Bei einer Flüssigkeit nämlich kann man sich an irgend einem der Kolben, durch welche wir Theile der Wand ersetzt haben, eine beliebige Kraft angebracht denken; das Gleichgewicht

wird immer bestehen können, vorausgesetzt, dass die Kräfte, welche an dem anderen Kolben angebracht sind, im richtigen Verhältniss zu der ersteren stehen. Bei einem Gase dagegen ist die Kraft, welche an jedem der Kolben angebracht werden muss, vollständig durch die Expansivkraft oder Spannkraft des Gases bestimmt, welche dasselbe in Folge seines fortwährenden Bestrebens, sich auszudehnen, gegen alle Wände des Gefässes ausübt. Wenn die Kraft, welche auf einen der Kolben wirkt, nicht gross genug wäre, so würde ihn das Gas auswärts drücken; wenn sie dagegen zu gross wäre, so würde das Gas zusammengedrückt werden, und der Kolben würde in das Innere des Gefässes eindringen. Indem man dem eben besprochenen Unterschied, der aus der Zusammendrückbarkeit und Elasticität der Gase entspringt, Rechnung trägt und auf diese Weise die Entwicklungen der §§. 263 bis 267 nochmals durchnimmt, gelangt man zu folgenden Resultaten.

1) Wenn eine Gasmasse in einem Gefäss enthalten ist, und zwei Kolben A und B (Fig. 380, Seite 548) verschliessen genau zwei Oeffnungen, welche in der Wand dieses Gefässes angebracht sind, so müssen sich die Kräfte, welche auf diese beiden Kolben ausgeübt werden müssen, um das Gas im Gleichgewicht zu halten, umgekehrt wie die Oberflächen dieser beiden Kolben verhalten.

2) Wenn eine Gasmasse in einem verschlossenen Gefäss enthalten ist, so sind die Drückungen, welche das Gas in Folge seiner Spannkraft auf verschiedene Wandstücke des Gefässes ausübt, proportional den Grössen dieser Wandstücke.

3) Wenn man durch einen Punkt A, der im Innern einer im Gleichgewicht befindlichen Gasmasse gelegen ist, verschiedene Ebenen hindurch legt, so sind die Drückungen, welche auf diese Ebenen ausgeübt werden, wenn man sie auf die Flächeneinheit bezieht, sämmtlich unter sich gleich: jede dieser Drückungen nennt man kurz den Druck oder *die Spannung in dem Punkte A*. Sie ist die nämliche, wo auch der Punkt A im Innern der Gasmasse genommen werden mag und überdies von derselben Grösse wie der Druck, der auf irgend ein Stück der Wand des Gefässes ausgeübt und auf die Flächeneinheit bezogen wird.

§. 294. **Die Gase sind schwer.** — Wir haben in dem Vorhergehenden vorausgesetzt, dass die Gasmoleküle nur der Wirkung der Kräfte ausgesetzt sind, welche sie selbst gegenseitig auf einander ausüben: aber dies ist in Wirklichkeit niemals der Fall. Die Gase sind schwer, ebenso gut wie die Flüssig-

keiten, und die Wirkung der Schwerkraft auf ihre Moleküle modificirt die Resultate, welche wir, ohne diese Wirkung zu berücksichtigen, im Vorhergehenden erhalten haben.

Sehen wir zunächst, wie man sich davon überzeugen kann, dass in der That auch die Gase der Wirkung der Schwerkraft unterworfen sind; auf die gewöhnliche Weise, wie dies bei den festen und flüssigen Körpern so leicht möglich ist, kann man sich nicht Gewissheit darüber verschaffen: wenn man eine Gasmasse frei loslässt, so sieht man sie nicht wie jene Körper zu Boden fallen. Doch ist der Versuch, welcher zeigt, dass auch die Gase, wie die atmosphärische Luft z. B., schwer sind, einfach anzustellen. Man nimmt einen grossen Ballon A (Fig. 426) von Glas, der an seiner Oeffnung mit einer Messingfassung und einem Hahn B versehen ist. Diese Messingfassung trägt inwendig ein Schraubengewinde, mittelst dessen der Ballon auf dem Teller einer Luftpumpe befestigt werden kann, wie es Fig. 426 zeigt. Wenn dies geschehen ist, öffnet man den Hahn B und pumpt mittelst der Luftpumpe die Luft aus dem Ballon aus. Nachdem man hierauf den Hahn B wieder geschlossen hat, schraubt man den Ballon vom Teller der Luftpumpe wieder ab und befestigt an seiner Fassung mittelst desselben Gewindes, das wir schon oben erwähnt haben, ein kleines Häkchen C, an welchem er unter der einen Waagschale einer Waage (Fig. 427) aufgehängt werden kann. Man legt, nachdem dies geschehen ist, auf die andere Schale so viele Gewichte, bis das Gleichgewicht hergestellt ist. Wenn man hierauf den Hahn des Ballons öffnet, so strömt die Luft von selbst wieder in ihn ein, und man sieht nun die Waagschale, an welcher der Ballon hängt, herabsinken. Um das Gleichgewicht wieder herzustellen, müssen auf die andere Schale noch Gewichte zugelegt werden, und diese auf's Neue zugelegten Gewichte geben offenbar das Gewicht der in dem Ballon enthaltenen Luft. Die Luft ist also schwer. Für andere Gase kann der Versuch auf die nämliche Art angestellt werden; nur muss man natürlich anstatt Luft das betreffende Gas in den Ballon einströmen lassen und ausserdem noch andere Umstände berücksichtigen, die wir jedoch jetzt noch nicht näher besprechen können.

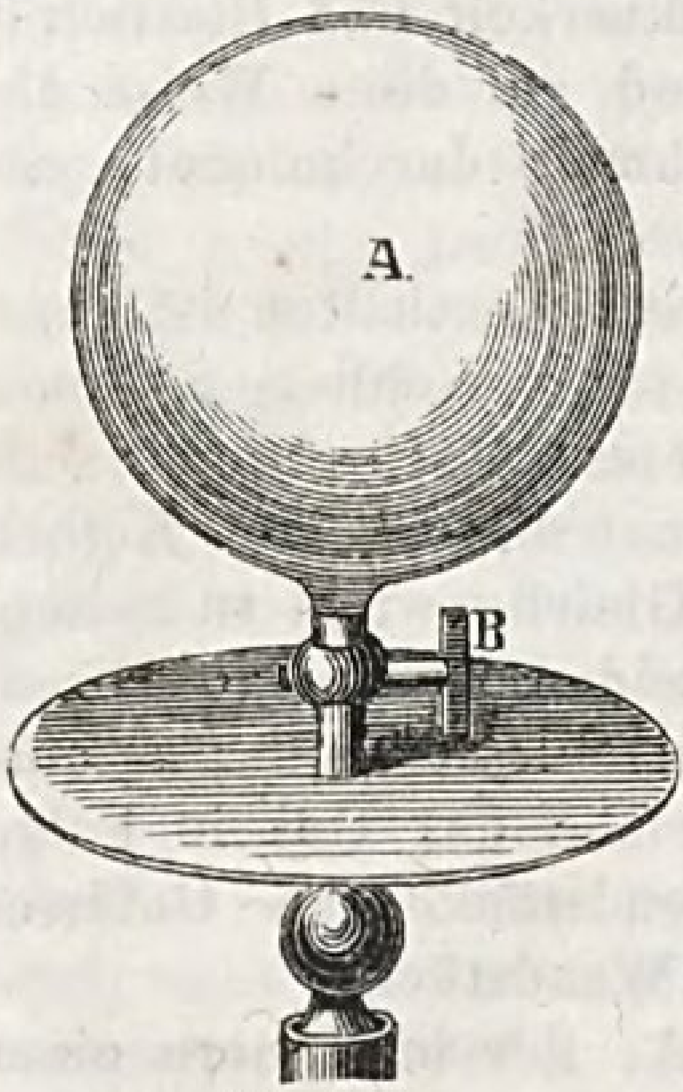


Fig. 426.

§. 295. **Drückungen in schweren Gasen.** — Indem man auf die Gase dieselben Schlussfolgerungen, welche wir in den §§. 268 bis 273 für die schweren Flüssigkeiten gemacht haben, anwendet und dabei die Zusammendrückbarkeit und Elasticität der Gase in Rechnung zieht, gelangt man zu folgenden Resultaten.

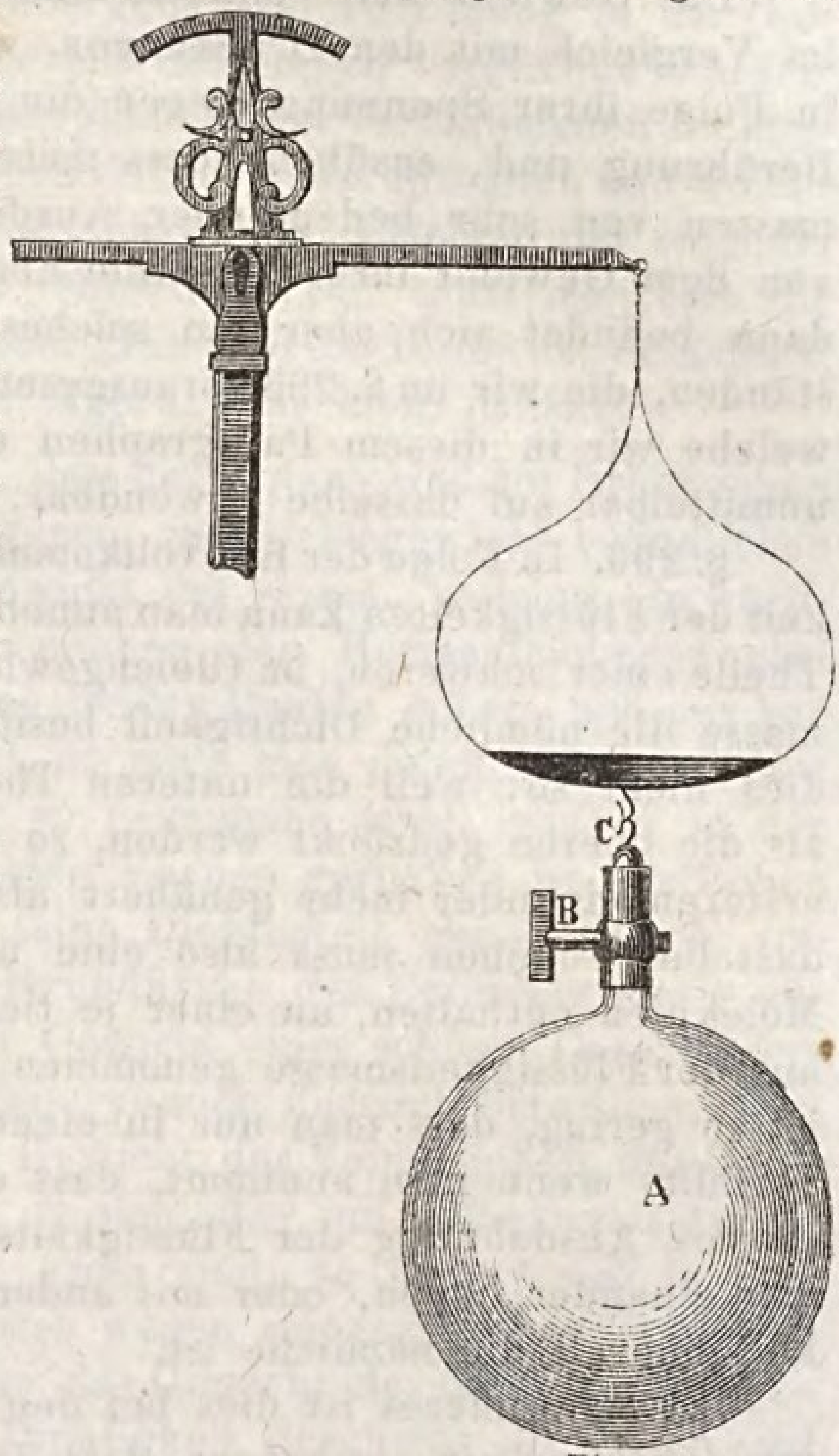


Fig. 427.

1) In einer schweren, im Gleichgewicht befindlichen Gasmasse sind die Drückungen, welche sehr kleine gleich grosse Theile der Ebenen, die alle durch einen und denselben Punkt im Innern der Gasmasse hindurch gehen, zu tragen haben, alle unter sich gleich. Der Gesammtdruck, welcher auf die Flächeneinheit jeder dieser Ebenen ausgeübt würde, wenn auf dieselbe überall der gleiche Druck stattfände, wie in der Nachbarschaft des Punktes A, heisst der Druck in dem Punkte A.

2) In einer schweren, im Gleichgewicht befindlichen Gasmasse ist der Druck in allen Punkten, welche in derselben Horizontalebene gelegen sind, gleich gross.

3) Der Druck in irgend einem Punkte einer schweren, im Gleichgewicht befindlichen Gasmasse ist gleich dem Druck in einem anderen, der höher als der erste gelegen ist, vermehrt um das Gewicht des Gases, welches ein vertikaler Cylinder enthält, der zwischen den Horizontalebenen steht, welche durch jene Punkte hindurch gehen und als Basis die Flächeneinheit hat.

4) Der Druck, welchen ein schweres, im Gleichgewicht befindliches Gas in irgend einem Punkte der Wand des Gefässes, welches es enthält, ausübt, ist gleich dem Druck auf einen anderen Punkt derselben Wand, der über dem ersten gelegen ist, vermehrt um das Gewicht des Gases, welches ein vertikaler Cylinder

enthält, der zwischen den Horizontalebenen steht, welche durch jene Punkte hindurch gehen, und als Basis die Flächeneinheit hat.

Das Gewicht der Volumeneinheit eines Gases ist so gering im Vergleich mit den Drückungen, welche die Gase gewöhnlich in Folge ihrer Spannung gegen die Flächen, mit denen sie in Berührung sind, ausüben, dass meistens, wenn man nicht Gasmassen von sehr bedeutender Ausdehnung zu betrachten hat, von dem Gewicht ihrer Moleküle abgesehen werden kann. Alsdann befindet sich aber ein solches Gas unter denselben Umständen, die wir im §. 293 vorausgesetzt haben, und die Resultate, welche wir in diesem Paragraphen erhalten haben, sind daher unmittelbar auf dasselbe anwendbar.

§. 296. In Folge der fast vollkommenen Unzusammendrückbarkeit der Flüssigkeiten kann man annehmen, dass die verschiedenen Theile einer schweren, im Gleichgewicht befindlichen Flüssigkeitsmasse die nämliche Dichtigkeit besitzen. Streng genommen ist dies nicht so: weil die unteren Theile der Flüssigkeit stärker als die oberen gedrückt werden, so werden die Moleküle in den ersteren einander mehr genähert als in den letzteren; ein und dasselbe Volumen muss also eine um so grössere Anzahl von Molekülen enthalten, an einer je tieferen Stelle dieses Volumen aus der Flüssigkeitsmasse genommen ist. Aber dieser Unterschied ist so gering, dass man nur in einen ganz unmerklichen Fehler verfällt, wenn man annimmt, dass die Moleküle überall, in der ganzen Ausdehnung der Flüssigkeitsmasse gleiche Entfernungen von einander haben, oder mit anderen Worten, dass die Dichtigkeit überall die nämliche ist.

Etwas Anderes ist dies bei den Gasen. Ihre grosse Zusammendrückbarkeit verursacht, dass der geringste Unterschied des Druckes zwischen zwei Punkten einer im Gleichgewicht befindlichen Gasmasse einen merkbaren Unterschied in der Dichtigkeit des Gases in diesen beiden Punkten hervorruft: die Dichtigkeit wird um so grösser, je stärker der Druck ist. In einer schweren, im Gleichgewicht befindlichen Gasmasse nimmt folglich die Dichtigkeit von ihren obersten bis zu ihren untersten Theilen fortwährend zu. In Punkten dagegen, welche in einer und derselben Horizontalebene gelegen sind, ist wie der Druck, der in ihnen stattfindet, so auch die Dichtigkeit durchweg dieselbe. Wenn man sich die ganze Gasmasse durch eine grosse Anzahl Horizontalebenen, die nur eine sehr geringe Entfernung von einander haben, in Schichten von sehr geringer Dicke zerschnitten denkt, so kann man die Dichtigkeit in jeder dieser Schichten durch die ganze Ausdehnung

derselben als gleich gross betrachten; dagegen wird die Dichtigkeit zunehmen, wenn man von einer dieser Schichten auf eine andere unter ihr gelegene übergeht. Die Anordnung in der Gasmasse kann auf diese Weise mit derjenigen verglichen werden, in welcher sich schwere Flüssigkeiten von verschiedenen Dichtigkeiten, welche in einem und demselben Gefäss enthalten und welche nach §. 283 durch ebene und horizontale Flächen von einander getrennt sind, übereinander schichten. Nur muss man sich die Anzahl dieser Flüssigkeiten sehr gross und die Dicke der Schichten, in welchen sie übereinander lagern, sehr klein denken.

Wenn man sagt (§. 295), dass der Unterschied der Drückungen in zwei Punkten einer schweren, im Gleichgewicht befindlichen Gasmasse gleich ist dem Gewicht des Gases, welches ein vertikaler Cylinder fasst, der zwischen den Horizontalebenen enthalten ist, welche durch jene beiden Punkte gehen, und der zur Basis die Flächeneinheit hat, so muss man dabei beachten, dass das Gas in diesem Cylinder so genommen wird, wie es in der Gasmasse zwischen den beiden Ebenen enthalten ist, zwischen denen der Cylinder steht; seine Dichtigkeit muss folglich von der unteren bis zur oberen Grundfläche des Cylinders stetig abnehmen. Man kann also das Gewicht eines solchen Gascylinders nicht wie das eines Flüssigkeitscylinders dadurch berechnen, dass man sein Volumen mit dem Gewicht der Volumeinheit des Gases multiplicirt (§. 277). Wenn es sich aber um Höhenunterschiede handelt, welche nicht sehr gross sind, so ändert sich in denselben die Dichtigkeit des Gases wegen seines geringen Gewichtes um nicht viel, und man kann das Gewicht des Gascylinders auswerthen, indem man seine Dichtigkeit durchweg als gleich und gleich der mittleren annimmt und dann ebenso verfährt wie bei einer Flüssigkeit; der Fehler, in welchen man dabei verfällt, ist in den meisten Fällen unmerklich.

§. 297. Wenn ein Gas in einem geschlossenen Gefäss enthalten ist, und man vergrössert die Dimensionen dieses Gefässes, so dehnt sich das Gas alsbald aus, um den ganzen Raum, welcher sich ihm darbietet, auszufüllen. Man hat noch niemals, in keinem Experiment eine Grenze dieser Ausdehnbarkeit der Gase gefunden. Stets hat sich gezeigt, dass eine gewisse Quantität Gas, wie klein dieselbe auch genommen wurde, allemal den ganzen Raum ausfüllte, der sich ihr darbot, wie gross derselbe auch sein mochte. Es gibt also keine freie Oberfläche eines schweren Gases, die wir unserer Betrachtung zu unterziehen hätten; in

keinem der Fälle, denen wir in unseren Versuchen begegnen werden, wird sich ein Gas in eine freie Oberfläche endigen.

Es ist indessen nicht wahrscheinlich, dass diese Eigenschaft der Gase, sich immerfort auszudehnen, wenn sie nicht daran gehindert werden, denselben wirklich ohne Grenze zukommt. Das Bestreben eines Gases, sich auszudehnen, rührt von der abstossenden Kraft her, die sich zwischen seinen Molekülen geltend macht, einer Kraft, welche der Wärme zugeschrieben werden muss, da sie sich vergrössert oder verkleinert, je nachdem die Temperatur des Gases steigt oder fällt. In dem Maasse jedoch, als das Gas sich ausdehnt, als sich seine Moleküle von einander entfernen, muss sich die abstossende Molekularkraft zwischen denselben vermindern, und sie wird bei fortgesetzter Ausdehnung endlich so klein werden, dass sie fast ganz verschwindet; dagegen wird sich dann die anziehende Kraft zwischen den Molekülen geltend machen, die allgemeine Kraft der Gravitation, der sich höchst wahrscheinlich kein Körper in der Natur entziehen kann. Man begreift daraus, dass sich ein Gas wohl in sehr weiten Grenzen, aber doch nicht bis in's Unendliche ausdehnen kann; seine Moleküle, nachdem sie einmal bis in eine gewisse Entfernung von einander gekommen sind, werden kein weiteres Bestreben mehr zeigen, diese Entfernung noch mehr zu vergrössern.

§. 298. **Atmosphäre.** — Die Luft, in welcher wir leben, ist ein Gas, welches ringsum die Erde umgibt. Was die Höhe betrifft, bis zu welcher sich dasselbe über die Oberfläche der Erde erstreckt, so wissen wir zunächst, dass überall, in jeder Höhe, die uns durch das Besteigen hoher Berge oder mittelst des Luftballons noch erreichbar ist, Luft angetroffen wurde. Die Luftmasse, welche sich über der Erdoberfläche ausdehnt und welche man die Atmosphäre der Erde nennt, besitzt also eine bedeutende Höhe; es ist aber nicht schwer einzusehen, dass sie sich nicht bis in's Unendliche erstrecken kann. Denken wir uns irgend ein Molekül der atmosphärischen Luft in gewisser Höhe über der Oberfläche der Erde und in der Ebene des Aequators derselben gelegen. Auf dieses Molekül wirken zunächst zwei Kräfte, die Anziehung, welche es von Seite der Erde erfährt, und die Centrifugalkraft, welche aus seiner Rotationsbewegung um die Erdachse entspringt; denn die ganze Atmosphäre muss sich nothwendig mit der Erde, und zwar mit derselben Winkelgeschwindigkeit wie diese um die Achse derselben drehen. Die erste dieser Kräfte sucht das Molekül der Oberfläche der Erde

zu nähern, die zweite wirkt in gerade entgegengesetztem Sinne. So lange nun das Molekül, welches wir betrachten, nicht sehr weit von der Oberfläche der Erde entfernt genommen wird, überwiegt die erste jener beiden Kräfte die zweite. Das Molekül sucht sich also der Erde zu nähern, wird aber durch die abstossende Wirkung, welche es von den benachbarten Molekülen erfährt und welche es von der Oberfläche der Erde zu entfernen sucht, daran verhindert. Aber wenn wir das in Rede stehende Molekül immer weiter und weiter von der Erdoberfläche entfernt, aber immer noch in der Aequatorebene gelegen annehmen, so wird die Kraft, mit welcher es von der Erde angezogen wird, immer kleiner, die Centrifugalkraft dagegen immer grösser; der Unterschied zwischen beiden, die Kraft, mit der sich das Theilchen der Erde zu nähern sucht, wird daher immer kleiner und folglich immer leichter von der abstossenden Kraft zwischen den Luftmolekülen selbst im Gleichgewicht gehalten. Die Folge davon ist, dass die gegenseitige Entfernung dieser Moleküle um so grösser und daher die Dichtigkeit der Luft um so kleiner werden muss, je höher man sich über die Oberfläche der Erde erhebt. Nun ist klar, dass man endlich bei fortgesetzter Erhebung auf einen Punkt kommen muss, wo die Schwerkraft nur gerade noch so gross als die Centrifugalkraft ist, wo sich also diese beiden Kräfte das Gleichgewicht halten. Ueber diesen Punkt hinaus kann sich aber, wie man leicht sieht, die Atmosphäre nicht erstrecken. Denn angenommen, es wären über diese Grenze hinaus noch Gasmoleküle gelegen, so würde an diesen die Centrifugalkraft die Schwerkraft überwiegen, sie würden also, so zu sagen, mit einer Kraft gleich dem Ueberschuss der ersteren über die letztere von der Erde weg in den Weltenraum hinaus getrieben und könnten keinen Theil der Atmosphäre mehr bilden. Man findet auf diese Weise, dass die Grenze der Atmosphäre in der Ebene des Aequators ungefähr 5000 geographische Meilen über der Oberfläche der Erde gelegen sein muss. Für diejenigen Luftmoleküle, welche ausserhalb des Aequators gelegen sind, gelten ganz ähnliche Schlüsse, nur hat man zu beachten, dass für dieselben die Centrifugalkraft nicht nur kleiner wird, sondern auch der Schwerkraft nicht mehr direkt entgegenwirkt.

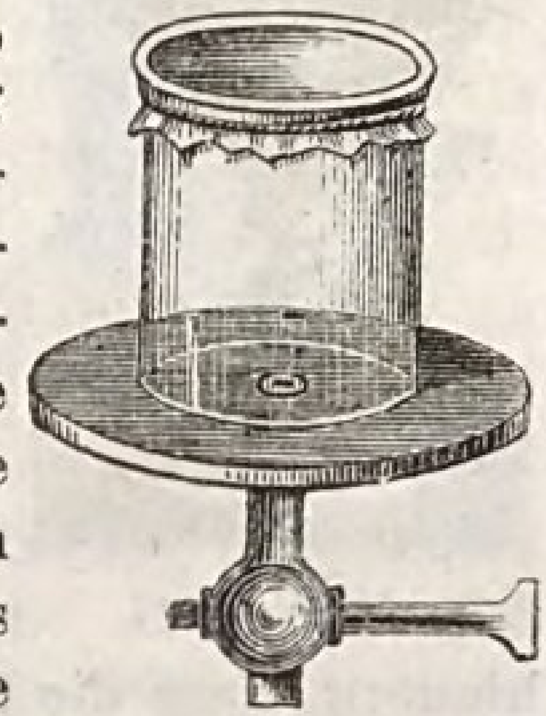
Aber man würde eine sehr unrichtige Vorstellung von dem Zustande der Erdatmosphäre haben, wenn man sich denken würde, dass die Luft den Raum zwischen der Oberfläche der Erde und der Grenze, die wir so eben gefunden haben, gleichmässig erfülle. Wir haben schon oben nachgewiesen, dass die Dichtigkeit der

Luft um so geringer werden muss, je höher man sich in derselben erhebt; und es ist leicht, uns auch noch auf anderem Wege Gewissheit darüber zu verschaffen. Denken wir uns einen Cylinder, der sich vertikal über der Erde bis zu einer beliebigen Höhe hin erhebt und untersuchen wir den Zustand der Luft im Innern dieses Cylinders. Jede der verschiedenen Schichten, in die man sich diese Luftsäule durch Horizontalebenen zerlegt denken kann, hat das Gewicht der über ihr liegenden Luftschichten zu tragen. Der Druck, welchen eine solche Luftschichte auszuhalten hat, ist also um so schwächer, je höher diese Schichte gelegen ist; und daraus folgt, dass die Dichtigkeit der Luft in dem Maasse abnehmen muss, als man sich über die Oberfläche der Erde erhebt. Das Gesetz, nach welchem diese Abnahme der Dichtigkeit erfolgt, kann entweder durch Rechnung, oder auch durch die Erfahrung ermittelt werden, indem man sich auf hohen Bergen oder in Luftballons so weit als möglich über die Oberfläche der Erde erhebt. Man hat dadurch gefunden, dass, wenn es möglich wäre, sich in eine Höhe von ungefähr 7 geographischen Meilen über die Erdoberfläche zu erheben, man dort nur noch eine so geringe Menge Luft antreffen würde, dass ihre Gegenwart durch keines der uns zu Gebot stehenden Mittel mehr nachgewiesen werden könnte. Für unsere Beobachtungen überschreitet also die Höhe der Atmosphäre nicht 7 geographische Meilen. Diese Zahl bleibt weit unter der, die wir oben angegeben haben; aber man muss desshalb nicht glauben, dass sie dieser widerspricht. Es sagt uns dieser Unterschied nur, dass sich die Atmosphäre noch weit über die Grenze hinaus erstreckt, bis zu welcher es uns möglich wäre, die Gegenwart der Luft nachzuweisen, wenn wir uns so weit erheben könnten; und zugleich sehen wir, dass der Uebergang aus dem Bereich der Atmosphäre in den luftleeren Raum ausserhalb derselben so ganz allmählich ist, dass von einer scharfen Grenze keine Rede sein kann.

Die Höhe von 7 geographischen Meilen erscheint sehr bedeutend, wenn man sie mit den Höhen vergleicht, die uns zugänglich sind. Die höchsten Berge unserer Erde sind nur sehr wenig über eine geographische Meile hoch. Gleichwohl ist die Luftverdünnung auf ihrem Gipfel bereits so weit vorgeschritten, dass Menschen auf längere Zeit in diesen Regionen nicht mehr leben können. Wenn man dagegen jene Höhe von 7 Meilen mit den Dimensionen der Erde selbst vergleicht, so sieht man, dass in Wirklichkeit die Atmosphäre nur eine sehr dünne Gashülle bildet, welche die Erde von allen Seiten umgibt.

§. 299. **Druck der atmosphärischen Luft.** — Die atmosphärische Luft übt einen Druck gegen die Oberfläche aller Körper aus, mit denen sie in Berührung ist. Aus dem Vorhergehenden folgt, dass dieser Druck, bezogen auf die Flächeneinheit, gleich dem Gewichte einer Luftsäule ist, die zur Basis die Flächeneinheit hat und welche bis zur Grenze der Atmosphäre hinaufreicht. Dieser Druck wird ebensowohl auf die Körper, welche sich im Innern eines Zimmers, als auf diejenigen, welche sich in freier Luft befinden, ausgeübt. Denn die Luft in einem Zimmer steht vermittelst der Kamine, sowie der Spalten und Ritzen an Thüren und Fenstern u. s. w. stets mit der äusseren Luft in Verbindung, sodass sich der Druck der atmosphärischen Luft mit ungeschwächter Stärke von aussen nach innen fortpflanzen kann. Folgende Versuche sollen dazu dienen, das Vorhandensein des Druckes der atmosphärischen Luft ausser Zweifel zu setzen und eine Vorstellung von der Grösse desselben zu geben.

Man nimmt einen hohlen Cylinder von Glas (Fig. 428), den man auf der einen Seite mit einer Thierblase, welche man fest um den Rand der Oeffnung herumbindet, luftdicht verschliesst. Diesen Cylinder stellt man auf den Teller einer Luftpumpe so, dass die Ränder seiner unverschlossenen Basis in innige Berührung mit der Fläche des Tellers kommen, zu welchem Zweck diese Ränder vorher abgeschliffen werden. Wenn man hierauf die Luft aus dem Innern des Cylinders fortschafft, indem man die Luftpumpe in Thätigkeit setzt, so sieht man die Blase ihre Gestalt verändern; während sie vorher eben war, wölbt sie sich jetzt nach innen zu einer concaven Fläche. Bevor man den Cylinder auf die Luftpumpe gestellt hatte, wurde die Thierblase auf ihren beiden Seiten von der atmosphärischen Luft, welche in ungehinderter Verbindung mit diesen Seiten stand, mit gleicher Stärke gedrückt. Aber wenn man einen Theil der Luft aus dem Innern des Cylinders entfernt, so übt die rückständige Luft keinen so grossen Druck mehr gegen die untere Fläche der Blase aus, und der auf die obere Seite stattfindende Druck wird daher nicht mehr im Gleichgewicht gehalten: die Blase wölbt sich in Folge dessen nach unten. Dieser einseitige Druck, welcher von oben nach unten auf die Blase ausgeübt wird, nähert sich in dem Maasse, als das Innere des Cylinders luftleer wird, mehr und mehr dem Gewichte der Luftsäule, welche


Fig. 428.

die Oeffnung des Cylinders als Basis hat und sich bis zur Grenze der Atmosphäre erhebt. Wenn auf diese Weise die Blase in Folge des bedeutenden Gewichtes, welches sie zu tragen hat, stark angespannt ist, so darf man sie nur leicht mit einem festen Körper berühren, um sie zerspringen zu machen. Dabei hört man einen Knall, der durch das plötzliche Einströmen der Luft in den luftverdünnten Raum hervorgebracht wird.

Ein anderer Versuch besteht darin, dass man die zuvor gut abgeschliffenen Ränder zweier hohler Halbkugeln von Messing (Fig. 429) in innige Berührung mit einander bringt, sodass sie luftdicht an einander anschliessen, und hierauf die Luft aus dem Innern der so gebildeten Hohlkugel fortschafft. Zu diesem Zweck ist eine der beiden Halbkugeln durchbohrt und der dadurch gebildete Kanal an seinem äusseren Ende mit einem Schraubengewinde versehen, mittelst dessen die Halbkugel in der Mitte des Tellers einer Luftpumpe befestigt werden kann. Nachdem hierauf die andere auf die eben beschriebene Weise in Verbindung mit ihr gebracht ist, setzt man die Luftpumpe in Thätigkeit und schafft dadurch die Luft aus dem Innern der beiden Halbkugeln durch den Kanal hindurch fort; wenn man glaubt, dass die Verdünnung der Luft weit genug fortgeschritten ist, schliesst man den Hahn an diesem Kanal, um zu verhindern, dass die Luft wieder eintritt, wenn man die Halbkugeln von dem Teller abschraubt; wenn man nun diese Halbkugeln zu trennen sucht, so bemerkt man sofort, dass sich dieser Trennung ein grosser Widerstand entgegensetzt; sie sind wie zusammengeleimt, und man kann sie nur durch Anwendung einer bedeutenden Kraft wieder von einander entfernen. Bevor man sie luftleer gemacht hatte, wurde jede der beiden Halbkugeln ebenso stark von innen als von aussen von der atmosphärischen Luft gedrückt. Aber nachdem man die Luft aus ihrem Innern wenigstens grösstentheils entfernt hat, ist der von innen nach aussen ausgeübte Druck gleichfalls fast ganz verschwunden; der von aussen nach innen ausgeübte Druck kann also fast seine volle Wirkung ausüben; die Folge davon ist, dass die beiden Halbkugeln stark aneinander angedrückt werden und nur getrennt werden können, indem man an jeder derselben eine Zugkraft anbringt, die im Stande ist, jenen Druck zu überwinden. Dieser Versuch wurde



Fig. 429.

zuerst von *Otto von Guericke*, Bürgermeister von Magdeburg, dem Erfinder der Luftpumpe, angestellt, und aus diesem Grunde haben die beiden beschriebenen Halbkugeln den Namen Magdeburger Halbkugeln erhalten.

Wir wollen endlich noch ein drittes Experiment angeben, das Jedermann mit der grössten Leichtigkeit wiederholen kann. Man nimmt ein Trinkglas und füllt dasselbe bis ganz oben an mit Wasser; hierauf bedeckt man seine Oeffnung mit einem Blatt Papier und kehrt es um, wobei man das Blatt mit der flachen Hand an die Ränder des Glases angedrückt hält, um zu verhindern, dass es durch die Bewegung herabfällt. Wenn das Glas umgekehrt und das Blatt Papier in eine horizontale Lage gekommen ist, so zieht man die Hand, mit welcher man es gehalten hat, zurück; man sieht dann, dass die Flüssigkeit nicht ausfliesst (Fig. 430); das Blatt Papier bleibt an dem Rand des Glases hängen, als wenn es daran geleimt wäre. Es ist klar, dass das Wasser durch den Druck der Luft, welcher von unten nach oben auf die untere Seite des Blattes wirkt, gehalten wird. Mit einiger Vorsicht gelingt es sogar, dieses Blatt horizontal von der Mündung des Glases wegzuziehen, ohne dass das Wasser ausfliesst. Aber während des Umkehrens muss man sich des Blattes Papier bedienen, wenn der Versuch gelingen soll, weil sich sonst die Oberfläche des Wassers gegen den Rand des Glases neigt und auf der unteren Seite desselben herausfliesst, während die Luft an der oberen eindringt.

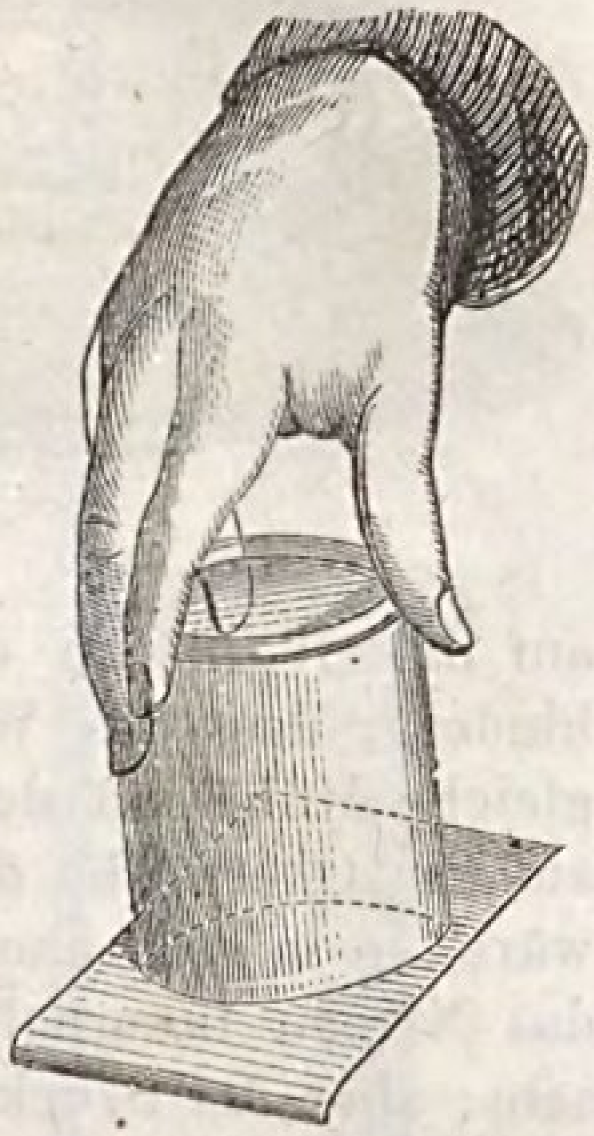


Fig. 430.

§. 300. **Das Barometer.** — Eine Glasglocke werde in eine mit Wasser gefüllte Wanne gebracht, sodass sie sich, indem sie zur Seite geneigt wird, vollständig mit Wasser füllt und keine Luft in ihrem Innern zurückbleibt; wenn man hierauf diese Glocke wieder theilweise aus dem Wasser herauszieht und sie dabei in solcher Lage hält, dass ihre Oeffnung, stets nach unten gekehrt, unter der Oberfläche des Wassers in der Wanne bleibt (Fig. 431), so wird man sehen, dass auch in dieser neuen Lage die Glocke vollständig mit Wasser gefüllt bleibt. Die alten Physiker, welche in dieser Erscheinung einen Widerspruch gegen die Gesetze des Gleichgewichts einer Flüssigkeit in communiciren-


Fig. 431.

den Gefässen sahen, suchten dieselbe zu erklären, indem sie der Natur einen Abscheu vor dem leeren Raum (horror vacui) zuschrieben. In der That sieht man, dass in dem Theil der Glocke, welcher sich über die Oberfläche des Wassers der Wanne erhebt, ein luftleerer Raum entstehen müsste, wenn sich das Wasser in demselben bis zur Höhe dieser Oberfläche herabsenken würde, da nirgends die Luft in diesem Raum eindringen kann.

Wir wissen, dass es der Druck der atmosphärischen Luft, ausgeübt auf die Oberfläche des Wassers in der Wanne ist, der es verhindert, dass das Wasser in der Glocke herabfällt und sich in gleiche Höhe mit dem in der Wanne stellt. Wenn dieser Druck auf die Oberfläche des Wassers in der Wanne nicht vorhanden wäre, so müsste nach dem Gesetze der communicirenden Gefässe das Niveau innerhalb und ausserhalb der Glocke das nämliche sein; aber der Druck der atmosphärischen Luft, welcher in diesem Falle einseitig, nur auf die Oberfläche des Wassers in der Wanne, nicht aber auf die des Wassers in der Glocke wirkt, zwingt die Flüssigkeit in der Glocke über das Niveau emporzusteigen, in welchem sie ohne dieses stehen würde.

Man begreift indessen, dass der Druck der atmosphärischen Luft das Wasser nicht bis zu jeder beliebigen Höhe erheben kann. Wenn die Glocke sehr hoch wäre, so würde sich das Wasser nicht in ihrer ganzen Höhe in ihr halten können; es würde sich nur so hoch stellen, dass der Unterschied der Höhen der Spiegel in der Glocke und in der Wanne dem Druck entsprechen würde, der diesen Unterschied verursacht. Wenn anstatt Wasser eine andere, dichtere Flüssigkeit genommen wird, so muss der Höhenunterschied der beiden Oberflächen, welcher durch die Wirkung des äusseren Druckes hervorgebracht wird, kleiner werden, und zwar um so kleiner, je grösser die Dichtigkeit der Flüssigkeit ist. Dieses Resultat kann mittelst Quecksilber leicht nachgewiesen werden. Zu diesem Behufe nimmt man eine gerade Glasröhre, die an einem Ende geschlossen ist und eine Länge von ungefähr 90 Centimeter hat; diese Röhre

füllt man vollständig mit Quecksilber, verschliesst hierauf ihr offenes Ende mit dem Finger und kehrt sie um, indem man zugleich dieses Ende unter die Oberfläche des Quecksilbers bringt, das in einem Gefäss enthalten ist. Wenn man hierauf den Finger von der Oeffnung der Röhre entfernt und dieselbe vertikal hält, sodass sie sich zu ihrem grössten Theil über das Quecksilber im Gefässe erhebt, so sieht man, dass die Röhre nicht vollständig mit Quecksilber gefüllt bleibt; das Quecksilber senkt sich herab, indem es einen leeren Raum über sich zurücklässt, und bleibt in solcher Höhe stehen, dass der Unterschied der Höhen der beiden Spiegel in der Röhre und im Gefäss ungefähr 76 Centimeter beträgt (Fig. 432).

§. **301.** Das oben beschriebene Experiment, welches zum erstenmal von *Toricelli* im Jahre 1643 gemacht wurde und desshalb kurz der *Toricelli*'sche Versuch heisst, führt uns nun dazu, die Grösse des Druckes der atmosphärischen Luft in Zahlen ausdrücken zu können. Das Quecksilber im Gefäss und in der Röhre befindet sich im Gleichgewicht; wenn man sich daher durch das Quecksilber im Gefäss eine Horizontalebene so gelegt denkt, dass sie auch das Stück der Röhre, welches in das Gefäss hereinragt, noch trifft, so müssen die Drückungen in allen Punkten dieser Ebene, gleichviel, ob sie innerhalb oder ausserhalb der Röhre genommen werden, gleich gross sein. Dies gilt auch noch, wenn als solche Horizontalebene diejenige genommen wird, welche der Spiegel des Quecksilbers im Gefäss bildet, und es muss daher der Druck, welcher in den ausserhalb der Röhre gelegenen Punkten dieser Ebene von Seite der atmosphärischen Luft ausgeübt wird, gleich sein dem Druck auf die im Innern der Röhre

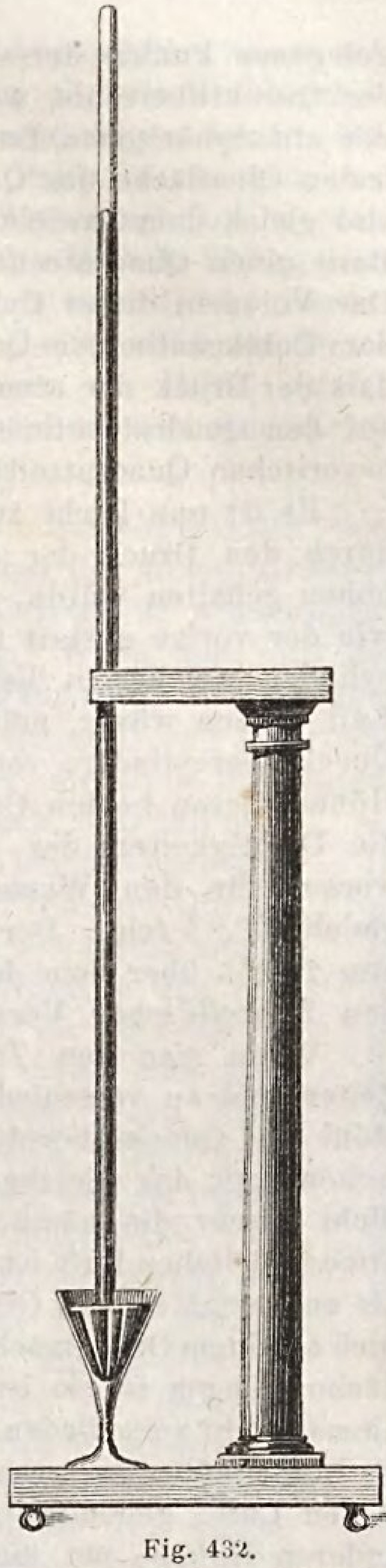


Fig. 432.

gelegenen Punkte derselben Horizontalebene, ausgeübt von Seite der Quecksilbersäule, welche in dieser Röhre steht. Der Druck der atmosphärischen Luft, welcher auf 1 Quadratcentimeter der freien Oberfläche des Quecksilbers im Gefäss ausgeübt wird, ist also gleich dem Gewichte eines Quecksilbercylinders, welcher als Basis einen Quadratcentimeter und als Höhe 76 Centimeter hat. Das Volumen dieses Cylinders ist 76 Cubikcentimeter, und weil der Cubikcentimeter Quecksilber $13^{gr},6$ wiegt, so folgt daraus, dass der Druck der atmosphärischen Luft 1033 Gramm oder $1^{k},033$ auf den Quadratcentimeter beträgt (11 Pfund bayerisch auf den bayerischen Quadratzoll).

Es ist nun leicht zu berechnen, bis zu welcher Höhe Wasser durch den Druck der atmosphärischen Luft in der Röhre erhoben gehalten würde, wenn man in einem ähnlichen Versuch wie der vorige anstatt Quecksilber Wasser nähme. Der Wassercylinder, welcher in diesem Fall den Druck der atmosphärischen Luft messen würde, müsste offenbar ebenso viel wiegen als der Quecksilbercylinder, von dem wir oben gesprochen haben; die Höhen dieser beiden Cylinder müssten sich also umgekehrt wie die Dichtigkeiten der entsprechenden Flüssigkeiten verhalten, woraus für den Wassercylinder eine Höhe von $0^{m},76 \times 13,6$ gleich $10^{m},33$ folgt. Der Spiegel des Wassers in der Röhre würde also $10^{m},33$ über dem des Wassers im Gefässe stehen, wenn man den *Toricelli*'schen Versuch mit Wasser anstellen würde.

Wenn man den *Toricelli*'schen Versuch zu verschiedenen Zeiten und an verschiedenen Orten wiederholt und jedesmal die Höhe der Quecksilbersäule, welche dem Drucke der atmosphärischen Luft das Gleichgewicht hält, genau misst, so findet man nicht immer die nämliche Zahl für dieselbe. Der Druck der atmosphärischen Luft ist also ebensowohl zu verschiedenen Zeiten als an verschiedenen Orten ein anderer. Wenn aber der Versuch an einem Ort gemacht wird, der nicht hoch über der Meeresfläche gelegen ist, so ist die Höhe der Quecksilbersäule von $0^{m},76$ niemals sehr verschieden. Gewöhnlich wird diese Höhe von $0^{m},76$ als Normalhöhe, entsprechend dem Normaldrucke der atmosphärischen Luft, genommen, und mit ihr vergleicht man dann die anderen Höhen, um eine Vorstellung von den Variationen des Luftdruckes zu erhalten.

Allemal, wenn ein Gas gegen die Wände, mit denen es in Berührung ist, einen Druck gleich dem einer Quecksilbersäule von $0^{m},76$ Höhe ausübt, so sagt man, dass dieser Druck eine Atmosphäre betrage. In gleicher Weise versteht man unter

einem Druck von zwei, drei, vier . . . Atmosphären einen solchen, welcher gleich ist dem Drucke, den eine Quecksilbersäule von zwei-, drei-, viermal $0^m,76$ Höhe hervorbringen würde. Das Wort Atmosphäre wird also in diesem Falle angewendet, um einen Druck zu bezeichnen, mit dem andere verglichen werden, und welcher auf diese Weise eine specielle Einheit bildet, mittelst welcher irgend ein Druck in Zahlen ausgedrückt werden kann. Man muss dabei stets im Auge behalten, dass ein Druck von einer Atmosphäre gleich ist dem Drucke von $1^k,033$ auf den Quadratcentimeter oder 11 Pfd. bayer. auf den bayer. Quadratzoll (s. die Tab. V am Schlusse dieses Buches).

§. 302. Es würde aber mit grossen Schwierigkeiten verknüpft sein, jedesmal, wenn man den Druck der atmosphärischen Luft messen wollte, den *Toricelli*'schen Versuch zu wiederholen; es ist dies aber auch gar nicht nöthig. Wenn man sich das Gefäss und die Röhre in Fig. 432 unveränderlich mit einander verbunden, etwa beide auf einem Brett befestigt und mit einem Maassstab versehen denkt, der es erlaubt, die Höhe der Quecksilbersäule in der Röhre messen zu können, so erhält man dadurch ein Instrument, mit welchem man in jedem Augenblick den Druck der Luft durch Beobachtung der Höhe der Quecksilbersäule in der Röhre messen kann. Ein solches Instrument heisst ein Barometer. Es kann natürlich in den verschiedensten Gestalten hergestellt werden, die aber alle auf das nämliche Princip zurückkommen. So erhält man auch ein Barometer, wenn man eine, an dem einen Ende geschlossene Glasröhre nimmt, deren anderes, offenes Ende umgebogen ist (Fig. 433). Diese Röhre füllt man auf irgend eine Weise, natürlich mit dem verschlossenen Ende nach unten gekehrt, mit Quecksilber und kehrt sie hierauf um, um sie in die Lage, wie es die Figur zeigt, das geschlossene Ende nach oben, zu bringen. Sobald dies geschehen ist, sieht man das Quecksilber im längeren Schenkel fallen, und zwar so weit, bis das Gleichgewicht zwischen dem Drucke der atmosphärischen Luft, welcher auf die freie Oberfläche des Quecksilbers im offenen Schenkel ausgeübt wird, und dem Drucke, welchen die Quecksilbersäule in dem längeren geschlossenen Schenkel hervorbringt, hergestellt ist. Ein solches Barometer (Fig. 433) wird wegen der Form, welche seine Röhre an ihrem unteren, gekrümmten Theil hat, Heberbarometer

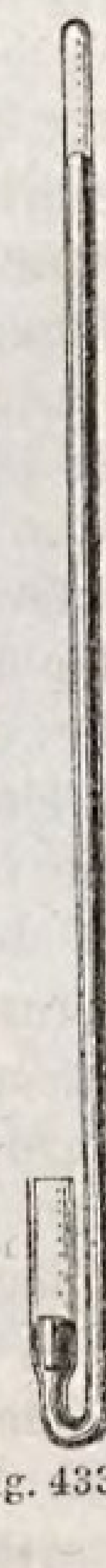


Fig. 433.

genannt, wogegen das, welches mit dem in Fig. 432 abgebildeten Apparat Aehnlichkeit zeigt, Gefässbarometer heisst.

Die Aenderungen, welche der Unterschied der Höhen der beiden freien Oberflächen des Quecksilbers in einem Barometer erfährt, rühren allemal von einer Bewegung der beiden Spiegel zugleich her. Wenn sich dieser Unterschied in der Höhe der beiden Spiegel, welchen man kürzer die Höhe des Barometerstandes oder auch wohl den Barometerstand selbst nennt, vergrössert, so steigt das Quecksilber in der Röhre und fällt in dem Gefäss oder in dem kurzen, offenen Arm, welcher dieses letztere beim Heberbarometer ersetzt, und der gewöhnlich auch kurz Gefäss genannt wird. Wenn dagegen die Höhe des Barometerstandes kleiner wird, so fällt das Quecksilber in der Röhre, während es im Gefäss steigt. Die Summe der beiden Aenderungen, welche auf diese Weise stets im entgegengesetzten Sinne die beiden freien Oberflächen des Quecksilbers erfahren, ist offenbar gleich der Grösse, um welche sich die Höhe des Barometerstandes vergrössert oder vermindert hat; aber diese Bewegungen der Spiegel können sehr verschieden von einander sein, je nach dem Verhältniss der Grösse der beiden Quecksilber-Oberflächen in der Röhre und im Gefäss. Setzen wir voraus, dass die Barometerröhre in der Gegend, wo sich das obere Ende der Quecksilbersäule befindet, nur eine geringe Weite habe, dass das Gefäss dagegen der freien Oberfläche des Quecksilbers, welches in ihm enthalten ist, gestattet, eine grosse Ausdehnung anzunehmen, so ist klar, dass ein Sinken des Quecksilbers in der Röhre nur ein sehr unbedeutendes Steigen der Oberfläche im Gefäss hervorrufen wird. Wenn dagegen die beiden freien Oberflächen in der Röhre und im Gefäss gleiche Ausdehnung haben, so wird die eine allemal um ebenso viel sinken, als die andere steigt. Wenn endlich die freie Oberfläche in der Röhre viel grösser als die im Gefäss wäre, so würde ein Sinken des Quecksilberspiegels in der Röhre ein viel grösseres Steigen desjenigen im Gefäss veranlassen. Es folgt aus dem Vorhergehenden, dass bei jedem Barometer, mit welchem der Barometerstand genau ermittelt werden soll, die Einrichtung so getroffen werden muss, dass man vor jeder Messung den Nullpunkt des Maassstabes mit dem Spiegel des Quecksilbers im Gefäss zusammenfallen machen kann. Dies kann entweder geschehen, indem man den Maassstab selbst verschiebbar macht, oder auch indem man ein Mittel anbringt, das wir später (§. 304) kennen lernen werden, und welches gestattet, den Spiegel im Gefäss beliebig heben oder senken zu

können. Nur bei solchen Barometern, bei denen die Grösse des Spiegels im Gefäss sehr bedeutend die der Oberfläche des Quecksilbers in der Röhre übertrifft, kann von einer solchen Aenderung des Nullpunktes der Scala oder des Spiegels im Gefäss vor jeder Messung abgesehen werden.

Die Variationen, welche die Höhe des Barometerstandes erfährt, stehen unleugbar in einem gewissen Zusammenhang mit dem Wechsel des Wetters. Man benützt desshalb das Barometer vielfach als Instrument, welches anzeigen soll, ob die Witterung gut oder schlecht werden wird. In diesem Falle wendet man gewöhnlich eine Art Heberbarometer an, gibt aber dem kürzeren offenen Arm desselben, welcher die Rolle des Gefässes spielt, einen bedeutend grösseren Durchmesser, als der Röhre; am häufigsten erhält dieses Gefäss eine birnförmige Gestalt, woher ein solches Barometer auch Birnbarometer heisst (Fig. 434). Auf diese Art werden dann die Aenderungen des Quecksilberspiegels im Gefäss, welche bei einer Aenderung des Barometerstandes eintreten, so klein, dass sie vernachlässigt werden können, und der Quecksilberspiegel in der Röhre kann also gleichsam als Zeiger an dem Maassstabe oder auch an der Witterungsscala dienen, die man neben der Barometerröhre angebracht hat. Aber man muss nie vergessen, dass die Witterung noch durch gar viele andere Faktoren, ausser dem Luftdruck, bestimmt wird, und dass schon aus diesem Grunde kein bestimmter unabänderlicher Zusammenhang zwischen dem Barometerstand und dem jeweilig vorhandenen oder gar erst zu erwartenden Wetter bestehen kann. Wissenschaftlich kann das Barometer nur zur Bestimmung des Luftdruckes gebraucht werden, und es geschieht dies, indem man die Höhe des Barometerstandes mittelst eines Maassstabes misst und in Zahlen ausdrückt.

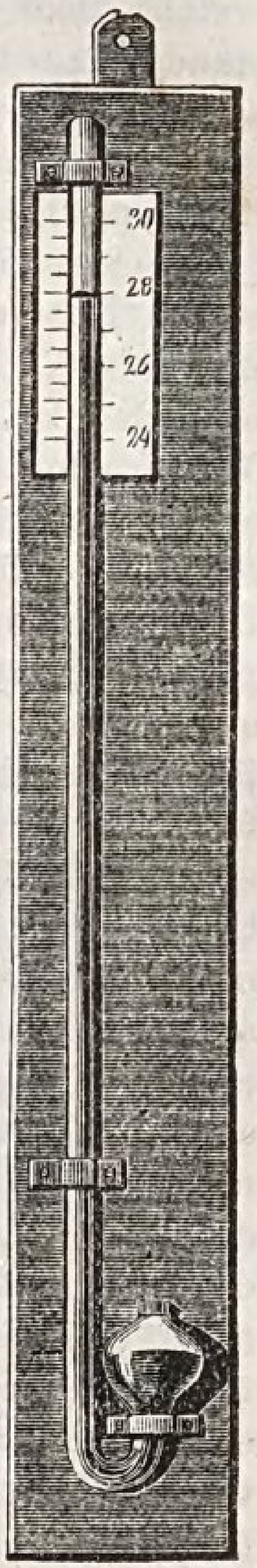


Fig. 434.

§. 303. Nach den allgemeinen Bemerkungen, welche wir oben über die Atmosphäre der Erde gemacht haben, ist es wohl klar, dass, wenn man ein Barometer von einem Punkt der Atmosphäre an einen höher gelegenen Punkt derselben bringt, die Höhe des Barometerstandes in Folge der Abnahme des Druckes

kleiner werden muss. Dieses Experiment wurde zum erstenmal auf Anregung *Pascal's* im Jahre 1648 gemacht; es wurde ein Barometer von dem Fusse des Puy de Dôme auf dessen Gipfel gebracht und dabei eine Verminderung des Barometerstandes um 84 Millimeter beobachtet. Da die Verminderung der Höhe des Barometerstandes um so grösser sein muss, je grösser die Höhe ist, auf welche man sich mit dem Instrument erhebt, so ist begreiflich, dass durch Beobachtungen des Barometerstandes, welche man an verschiedenen Punkten anstellt, der Höhenabstand dieser Punkte bestimmt werden kann. Dies geschieht denn auch in der That; auf die Betrachtungen, welche wir oben angestellt haben, gründet sich das Messen der Höhe der Berge mit dem Barometer.

Bei gewöhnlicher Temperatur und bei einem Luftdruck, wie er am Niveau des Meeres stattfindet, ist die atmosphärische Luft ungefähr 770 mal leichter als ein gleiches Volumen Wasser und folglich 10 472 mal leichter als ein gleiches Volumen Quecksilber. Wenn man sich demnach um $10^m,472$ in vertikaler Richtung erhebt, so muss das Quecksilber im Barometer um eine 10472 mal so kleine Grösse, d. h. um einen Millimeter fallen. Eine vertikale Erhebung von blos 1^m hat also eine Verminderung der Höhe des Barometerstandes um ungefähr einen zehntel Millimeter zur Folge, eine Grösse, die noch messbar ist. Wenn die Luft überall, in jeder Höhe die nämliche Dichtigkeit besässe, so wäre nichts einfacher als den Höhenunterschied zwischen zwei beliebigen Punkten mittelst des Barometers zu messen: Vorausgesetzt, dass die Dichtigkeit der Luft überall die oben angegebene wäre, so hätte man nur die Zahl der Millimeter, um welche das Barometer, indem man von dem tiefer zu dem höher gelegenen der beiden Punkte emporsteigt, fällt, mit 10 472 zu multipliciren, um den Höhenabstand dieser Punkte in Millimetern zu erhalten. Aber dem ist nicht so. Die Dichtigkeit der Luft nimmt fortwährend ab, in dem Maasse, als man sich in der Atmosphäre erhebt; um also die nämliche Verminderung des Barometerstandes zu erzielen, muss man sich um so mehr erheben, je höher man sich schon über der Meeresfläche befindet. Ein Sinken des Barometers um einen zehntel Millimeter, welches an der Meeresfläche einer vertikalen Erhebung von ungefähr einem Meter entspricht, wird in grösserer Höhe bald erst durch eine Erhebung von 2, 3, 4 Meter hervorgebracht werden. Ausserdem ändert sich die Temperatur von einer Höhenschichte der Luft zur anderen; die Dichtigkeiten dieser Schichten sind also nicht die, welche sie

sein würden, wenn die Temperatur überall in der ganzen Atmosphäre dieselbe wäre. Dazu kommen noch andere Umstände, welche die in Rede stehende Aufgabe zu einer sehr verwickelten machen. Dessenungeachtet ist es gelungen, Tabellen zu berechnen, welche auf sehr bequeme Weise den Höhenabstand zweier Punkte aus den Beobachtungen des Barometerstandes und der Temperatur, welche an diesen Punkten angestellt wurden, mit hinlänglicher Genauigkeit finden lassen. Solche Tabellen werden alljährlich in dem „Annuaire du Bureau des longitudes" publicirt, finden sich aber ausserdem noch in den Tabulae Regiomontanae von *Bessel* und, durch die neuesten Untersuchungen verbessert, in *Bauernfeind's* „Beobachtungen etc."

§. 304. Um zu dem Zwecke, den wir eben bezeichnet haben, gebraucht werden zu können, muss das Barometer vor Allem der Bedingung genügen, dass es den Unterschied in der Höhe der beiden freien Oberflächen des Quecksilbers mit grosser Genauigkeit bestimmen lässt; ausserdem soll es auch noch möglichst leicht und bequem transportirt werden können. Ein Barometer, welches diesen Bedingungen genügt, heisst man wohl auch ein Reisebarometer, und es können dieselben in verschiedenen Formen, als Gefäss- oder als Heberbarometer angefertigt werden. Wir geben im Folgenden eine Beschreibung des Barometers von *Fortin*.

Das Barometer kann an dem obersten Theil eines dreifüssigen Gestelles aufgehängt werden (Fig. 435), und man bringt es jedesmal in diese Lage, wenn man eine Beobachtung machen will. Wenn die drei Füsse des Gestells zusammengelegt werden, so lassen sie zwischen sich einen hohlen Raum, in welchem sich das Barometer während des Transportes befindet; das Stativ bildet auf diese Weise eine Art von Futteral, das dazu bestimmt ist, das Instrument auf der Reise zu schützen.

Das *Fortin*'sche Barometer ist, wie die Figuren 435 und 436 auf den ersten Blick zeigen, ein Gefässbarometer. Wir haben oben gesehen, dass, wenn der Spiegel des Quecksilbers in der Röhre steigt oder fällt, der des Quecksilbers im Gefäss zu gleicher Zeit fällt oder steigt; um also die Aenderungen in der Höhe des Barometerstandes genau zu erhalten, ist es nöthig, stets den Nullpunkt des Maassstabes mit der freien Oberfläche des Quecksilbers im Gefäss zusammenfallen machen zu können. Zu diesem Behufe ist bei dem in Rede stehenden Instrument der Boden des Gefässes beweglich gemacht. Derselbe wird nämlich von einer Art Beutel aus Handschuhleder gebildet, und in seiner Mitte

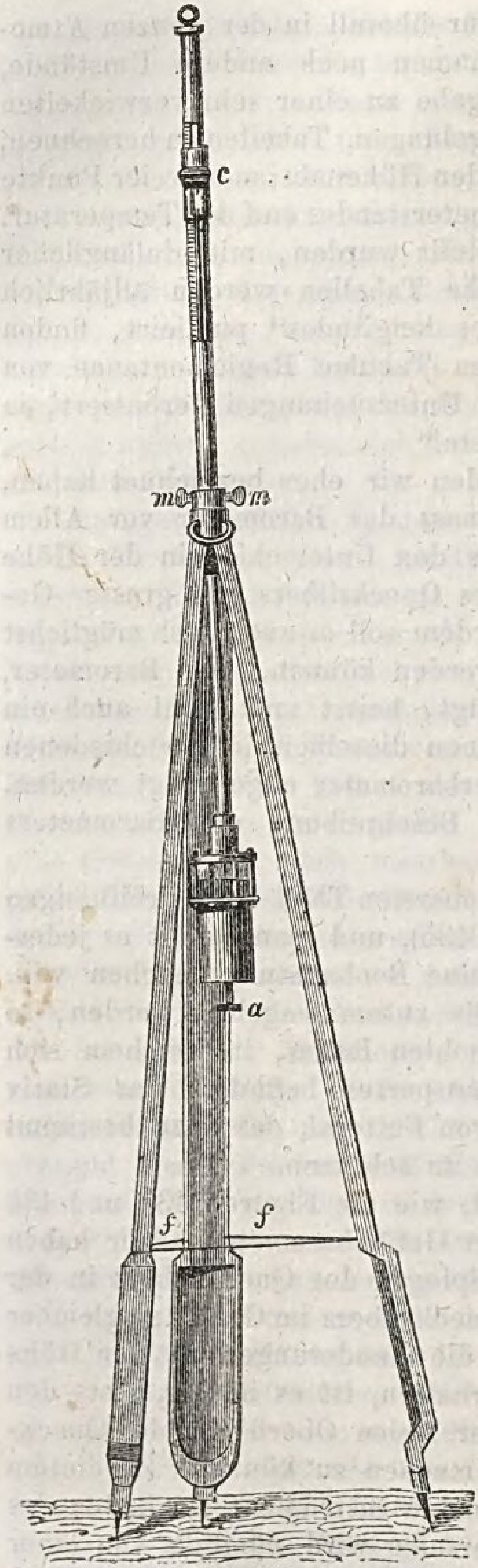


Fig. 435.

endigt sich eine Schraube *a* (Fig. 436). Indem man diese Schraube in dem einen oder anderen Sinn dreht, kann man den beweglichen Boden und mit ihm also den Spiegel des Quecksilbers im Gefäss heben oder senken und es auf solche Weise leicht dahin bringen, dass dieser Spiegel mit dem Nullpunkt des Maassstabes, welcher neben der Barometerröhre angebracht ist, zusammenfällt. Erst nachdem dies geschehen ist, gibt der Theilstrich des Maassstabes, an welchem der Spiegel des Quecksilbers in der Röhre steht, die richtige Höhe des Barometerstandes an. Um die Einstellung des Spiegels im Gefäss auf den Nullpunkt der Scala zu erleichtern, wird dieser letztere von der Spitze eines Elfenbeinstiftes *b*, welcher von dem Deckel des Gefässes herabreicht, gebildet. Dieser Stift spiegelt sich in der Oberfläche des Quecksilbers und diese muss so lange gehoben oder gesenkt werden, bis die Spitze des Stiftes selbst und die seines Spiegelbildes sich eben berühren, ohne dass die Reflexion des Lichtes an der Oberfläche des Quecksilbers die mindeste Gestaltsveränderung

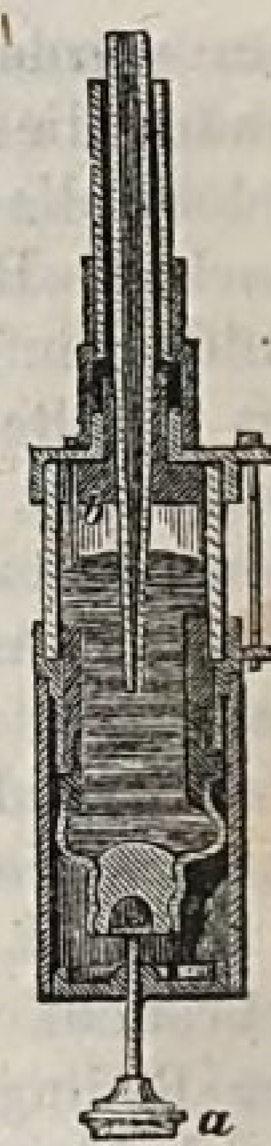
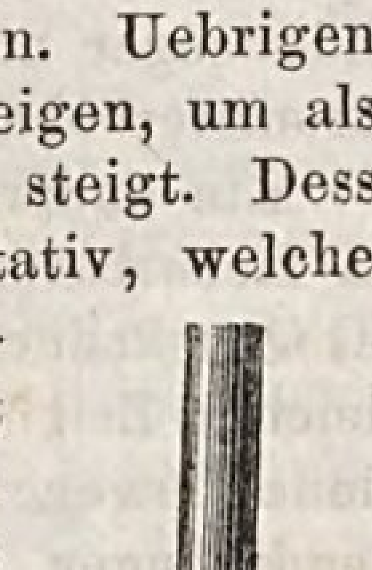


Fig. 436.

dieser Oberfläche, mit welcher die Spitze des Stiftes in Berührung ist, anzeigt.

Die Scala, mittelst welcher die Höhe des Barometerstandes gemessen wird, ist hier auf einer Hülse von Metall angebracht, welche die Barometerröhre umschliesst, und welche in der Gegend, wo sich der Quecksilberspiegel in der Röhre befindet, auf zwei entgegengesetzten Seiten aufgeschlitzt ist. Um den Punkt derselben, welcher dem Spiegel des Quecksilbers in der Röhre entspricht, genau bestimmen zu können, bedient man sich eines Schiebers *c* (Fig. 435), welcher ebenfalls an den gerade entgegengesetzten Seiten zwei Oeffnungen hat, durch welche man hindurch sieht, um das Quecksilber in der Röhre zu beobachten. Man hält dabei das Auge stets in solcher Höhe, dass die Visirlinie über die in gleicher Höhe gelegenen unteren Ränder der beiden Oeffnungen hinweggeht, und verschiebt den Schieber so lange, bis diese Visirlinie den obersten Gipfel der Quecksilberkuppe (§. 290) in der Röhre eben berührt. Mittelst eines Nonius, der auf dem Schieber angebracht ist, und dessen Nullpunkt in gleicher Höhe mit den beiden unteren Rändern der Oeffnungen dieses Schiebers liegt, kann die Höhe des Barometerstandes bis auf zehntel Millimeter genau bestimmt werden.

Damit das auf diese Weise erhaltene Resultat richtig sei, ist es nothwendig, dass die Barometerröhre genau vertikal hängt; denn wenn sie schief hängen würde, so würde die Länge, welche die Quecksilbersäule in dieser Röhre einnimmt, grösser sein als das, was man unter der Höhe des Barometerstandes versteht; diese Höhe ist der vertikale Abstand der beiden Horizontalebenen, welche durch die beiden freien Oberflächen des Quecksilbers in der Röhre und im Gefäss gelegt werden können. Uebrigens darf man nur ein vertikal hängendes Barometer neigen, um alsbald zu sehen, dass das Quecksilber in der Röhre steigt. Desshalb kann das *Fortin*'sche Barometer an dem Stativ, welches es während der Beobachtung tragen soll, so aufgehängt werden, dass es mit grösster Leichtigkeit die vertikale Lage annehmen kann, welche ihm in Folge des bedeutenden Gewichtes des Quecksilbers im Gefäss die Wirkung der Schwere von selbst zu geben sucht. Zwei kleine Schrauben *m*, *m* (Fig. 437) dienen dazu, die metallene Hülse des Barometerrohrs in einer Art kleiner Muff *n* zu befestigen, durch welche sie hindurchgeht. An dieser Muff


Fig. 437.

sind zwei kleine Stifte *o*, *o* angebracht und bilden eine Achse, um welche das Barometer in einer gewissen Richtung frei schwingen kann; diese Stifte ruhen in zwei Oeffnungen eines Ringes *p*, welcher sich selbst wieder um zwei andere kleine Stifte *q* frei drehen kann, welche eine zweite Achse, senkrecht auf die erste, bilden. Mittelst dieser beiden Aufhängeachsen kann dem Barometer jede Richtung, welche man will, gegeben werden; der Wirkung seines Gewichts frei überlassen, stellt es sich also vertikal wie ein Bleiloth. — Die kleinen Eisenstäbe *f*, *f* (Fig. 435), welche an den drei Füssen des Stativs angebracht sind und sie zu je zweien mit einander verbinden, dienen dazu, diese Füsse in unveränderlicher Lage gegen einander zu halten, während man die Beobachtung macht, und auf diese Weise zu verhindern, dass durch ein zufälliges Anstossen an einen der Füsse das ganze Stativ und mit ihm das Barometer umgeworfen wird.

In dem Zustande, in welchem sich das Barometer während einer Beobachtung befindet, wo also beide Quecksilberspiegel, der in der Röhre wie der im Gefäss, frei sind, kann das Instrument nicht transportirt werden; diese Spiegel, namentlich der in der Röhre, würden dadurch so heftigen Schwankungen, selbst beim vorsichtigsten Tragen, ausgesetzt werden, dass die Röhre zertrümmert werden würde. Um das *Fortin*'sche Barometer zum Transport zuzurichten, wird das zu diesem Behufe zweckmässig eingerichtete Gefäss durch ein Pfröpfchen luftdicht verschlossen; hierauf schraubt man die Schraube *a* (Fig. 436) so weit in die Höhe, bis die durch das Steigen des Quecksilbers im Gefäss zusammengedrückte Luft, welche in diesem letzteren enthalten ist und nirgends entweichen kann, das Quecksilber in der Röhre bis an das oberste Ende derselben hinaufhebt und gegen dieses Ende sogar noch etwas andrückt. In diesem Zustande kann das Barometer ohne Gefahr transportirt werden.

Ein anderes Reisebarometer ist das von *Gay-Lussac*. Es ist ein Heberbarometer, bei welchem die beiden freien Oberflächen des Quecksilbers gleiche Ausdehnung haben und sich folglich zu gleicher Zeit um gleiche Grössen, aber in entgegengesetztem Sinne bewegen. Es ist also hier ganz besonders nöthig, die Aenderungen des Quecksilberspiegels in den beiden Schenkeln des Barometers in Betracht zu ziehen, um die ganze Aenderung des Barometerstandes richtig zu erhalten. Zu diesem Behufe ist gewöhnlich die Scala verschiebbar. Die Fig. 438 zeigt die Gestalt der Röhre des *Gay-Lussac*'schen Barometers. Man sieht den kürzeren Schenkel desselben ganz verschlossen und nur mit

einer engen Oeffnung *a* versehen, durch welche zwar die Luft ungehindert mit dem Innern dieses Schenkels communiciren, aber das Quecksilber nicht austreten kann. Um dieses Barometer nämlich transportiren zu können, muss es ganz umgekehrt und in die Lage gebracht werden, wie sie Fig. 439 zeigt; es kann dabei, wie man sieht, kein Quecksilber verloren gehen. Dieses Umkehren muss vorsichtig und langsam geschehen, weil sonst das Quecksilber in der Röhre so rasch steigt, dass es, am Ende derselben ankommend, dieses Ende hinausschlägt.

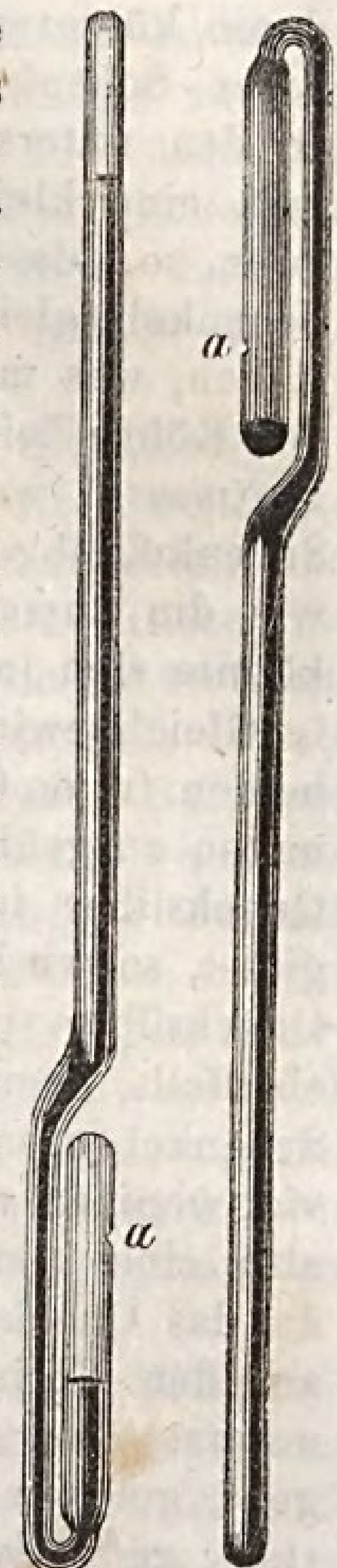


Fig. 438. Fig. 439.

§. 305. **Das Mariotte'sche Gesetz.** — Wenn ein Gas zusammengedrückt wird, so vermehrt sich die Spannung desselben. Die Drückungen, welche es auf die verschiedenen Theile der Wand des Gefässes, in dem es eingeschlossen ist, ausübt, wachsen in dem Maasse, als sich sein Volumen vermindert. Der Zusammenhang, welcher zwischen dem Drucke und dem Volumen einer gewissen Gasmasse stattfindet, wurde zuerst von *Mariotte* erkannt und in folgendem Gesetz, das seinen Namen trägt, ausgesprochen: Die Spannung einer Gasmasse, deren Temperatur dieselbe bleibt, ändert sich im umgekehrten Verhältniss des Volumens, welches sie einnimmt. Wenn also ihr Volumen auf die Hälfte, das Drittel, Viertel verringert wird, so wird ihre Spannung zwei-, drei-, viermal so gross. Die Bedingung, dass die Temperatur der Gasmasse, welche man betrachtet, dieselbe bleibt, ist wesentlich und darf nicht übersehen werden. Wenn man das Volumen einer Gasmasse plötzlich vermindert, so bemerkt man, dass ihre Temperatur steigt; im Gegentheil, wenn man einer Gasmasse gestattet, sich rasch auszudehnen, so sinkt ihre Temperatur. Damit folglich die Spannungen, welche eine Gasmasse, deren Volumen man abändert, nach und nach annimmt, das *Mariotte*'sche Gesetz befriedigen, muss man diese Spannungen erst dann messen, nachdem das Gas Zeit gehabt hat, die Temperatur, welche es vorher besass, also für gewöhnlich die Temperatur seiner Umgebung, wieder anzunehmen.

Das *Mariotte*'sche Gesetz kann leicht auf folgende Art erwiesen werden: Man nimmt eine gebogene Röhre (Fig. 440),

deren kürzerer Schenkel oben geschlossen ist, während ihr längerer Schenkel oben offen gelassen wurde. In den untersten Theil dieser Röhre bringt man eine kleine Quantität Quecksilber und zwar so, dass seine Oberflächen in beiden Schenkeln gleich hoch, in der Horizontalen ab stehen, was man durch zweckmässiges Neigen der Röhre leicht erreicht. Dann besitzt die Luftmasse, welche dadurch in dem kleinen Schenkel abgesperrt ist, dieselbe Spannung, wie die äussere Luft; denn das Quecksilber könnte sich in der angegebenen Stellung nicht im Gleichgewicht halten, wenn nicht auf seine beiden freien Oberflächen gleich grosse Drückungen ausgeübt würden. Wenn man hierauf Quecksilber in dem längeren Schenkel aufgiesst, so wird das Gleichgewicht gestört; das Quecksilber steigt in dem kürzeren Schenkel ebenfalls, aber da es die Luft, welche in diesem Schenkel enthalten ist, zusammendrücken muss, viel weniger als in dem langen. Es stellt sich also eine neue Gleichgewichtslage her, und da das Quecksilber in den Punkten, welche auf der Horizontalebene cd, die durch den untersten der beiden freien Quecksilberspiegel geht, gelegen sind, in beiden Schenkeln gleich stark gedrückt sein muss, so folgt, dass der



Fig. 440.

Druck, welchen die Luft, die in dem kürzeren Schenkel eingeschlossen ist, ausübt, gleich ist dem Druck der äusseren Luft, welcher auf die freie Oberfläche im längeren Schenkel stattfindet, vermehrt um den Druck, welcher von der Quecksilbersäule herrührt, welche in diesem längeren Schenkel über der Horizontalebene cd steht. Wenn man das neue Volumen, welches von der Luftmasse, die in dem kürzeren Schenkel eingeschlossen ist, eingenommen wird, mit dem Volumen vergleicht, welches sie besass, als sie noch unter dem Drucke der atmosphärischen Luft stand, so findet man, dass diese beiden Volumen im umgekehrten Verhältniss zu den entsprechenden Drückungen stehen. Wenn z. B. das Quecksilber im kurzen Schenkel so weit gestiegen ist, dass die Luft in demselben nur noch die Hälfte des Raumes einnimmt, so ist die Differenz der Höhen der Quecksilberspiegel in den beiden Schenkeln gleich der Höhe des Barometerstandes;

das Gas erleidet also einen Druck, doppelt so gross als der der atmosphärischen Luft ist. Wenn das Volumen der Luftmasse nur auf zwei Drittel des ursprünglichen reducirt wäre, so würde der Unterschied der Höhe des Quecksilbers in beiden Schenkeln gleich der halben Barometerhöhe gefunden werden; das Gas würde folglich einen Druck von einer und einer halben Atmosphäre zu tragen haben.

Es wurden zahlreiche Versuche gemacht, um die Richtigkeit des *Mariotte*'schen Gesetzes für atmosphärische Luft sowohl, wie für verschiedene andere Gase nachzuweisen. Die neuesten und zu gleicher Zeit genauesten sind die von *Regnault*. Diese Experimente, in welchen Drückungen bis zu 28 Atmosphären angewandt wurden, haben gezeigt, dass das *Mariotte*'sche Gesetz nicht streng richtig ist. Es gibt besonders ungenaue Resultate für Drückungen, welche sich denjenigen nähern, bei welchen die dem Experiment unterworfenen Gase in den flüssigen Zustand übergehen. Aber die Unterschiede zwischen den Volumen, welche eine und dieselbe Gasmasse, die verschiedenen Drückungen unterworfen ist, wirklich annimmt, und denjenigen, welche sie nach dem *Mariotte*'schen Gesetz annehmen sollte, sind so klein, dass man dieses Gesetz in allen Anwendungen auf die praktische Mechanik ohne bemerkenswerthen Fehler als völlig genau annehmen darf.

§. 306. **Ausdehnung der Gase durch die Wärme; Gay-Lussac'sches Gesetz.** — Wenn man die Temperatur einer Gasmasse abändert, so ist die Wirkung, welche dadurch hervorgebracht wird, verschieden, je nach den Umständen, unter denen sich das Gas befindet. Wenn es sein Volumen ungehindert vermehren oder vermindern kann, ohne dass der Druck, welchen es von Seite der Wände des Gefässes, in dem es eingeschlossen ist, erleidet, geändert wird, so dehnt es sich bei Erhöhung der Temperatur aus und zieht sich bei Verminderung derselben zusammen; die Aenderungen der Temperatur veranlassen eine Aenderung des Volumens, ohne dass die Spannung des Gases eine andere wird. Wenn dagegen das Gas in einem Gefäss eingeschlossen ist, das ihm nicht gestattet, ein anderes Volumen einzunehmen, so wird durch Erhöhung der Temperatur seine Spannung vergrössert, durch Erniedrigung derselben dagegen vermindert.

Dieses zweite Resultat ist nur eine Folge des ersten. Wenn die Temperatur einer Gasmasse erhöht wird, ohne dass sich ihr Volumen ändern kann, so kann man sich auch vorstellen, dass

sie zunächst durch die Wirkung der Wärme ausgedehnt würde, ohne dass ihre Spannkraft eine andere wird, und dass man sie hierauf unter Beibehaltung der neuen Temperatur, welche ihr gegeben worden ist, auf ihr ursprüngliches Volumen zurückführt, wodurch offenbar eine Erhöhung ihrer Spannkraft eintreten muss. Das *Mariotte*'sche Gesetz sagt uns, dass bei diesem letzten Theil des Vorgangs die Spannkraft des Gases in dem Verhältniss seines Volumens zu dem Volumen, welches es vor dieser Zusammendrückung angenommen hatte, zunimmt, d. h. also in dem Verhältniss seines ursprünglichen Volumens zu dem Volumen, welches es annehmen würde, wenn es sich ungehindert, ohne Aenderung seiner Spannkraft ausdehnen könnte. Wenn man sich also vorstellt, dass eine und dieselbe Temperaturerhöhung eine Gasmasse in dem einen Fall ungehindert ausdehnen kann, ohne dass sie die Spannkraft derselben ändert, während sie in dem anderen Fall bei unveränderlichem Volumen die Spannung des Gases erhöht, so folgt aus dem Vorhergehenden, dass die Volumen in dem ersten Fall in demselben Verhältniss zunehmen, wie die Spannkräfte in dem zweiten. Wenn in dem ersten Fall das Volumen des Gases um die Hälfte, das Drittel, das Viertel, ... desjenigen zunehmen würde, welches es vorher hatte, so würde sich in dem zweiten Fall die Spannkraft ebenfalls um die Hälfte, das Drittel, das Viertel ihrer ursprünglichen Grösse vermehren.

Indem *Gay-Lussac* die Ausdehnung der Gase durch die Wärme unter constantem Druck näher untersuchte, fand er, dass diese Ausdehnung bei der nämlichen Aenderung der Temperatur für alle Gase die nämliche ist, also von ihrer Natur nicht abhängt. Man nannte diesen Satz das *Gay-Lussac*'sche Gesetz.

In neuester Zeit machte *Regnault* sehr zahlreiche und genaue Versuche über die Ausdehnung der Gase und erkannte, dass das *Gay-Lussac*'sche Gesetz nicht streng richtig ist: Es dehnen sich bei gleicher Temperaturerhöhung nicht alle Gase und nicht einmal ein und dasselbe Gas in verschiedenen Zuständen um die nämliche Grösse aus. Aber wir können für das *Gay-Lussac*'sche Gesetz wiederholen, was wir für das *Mariotte*'sche Gesetz gesagt haben: für die Anwendung auf die praktische Mechanik können wir es als völlig genau betrachten, ohne einen bemerkenswerthen Fehler dadurch zu begehen.

Nach *Regnault's* Versuchen nimmt das Volumen einer Gasmasse, welche eine constante Spannung behält, für jeden Grad

des *Celsius*'schen Thermometers um $^{11}/_{3000}$ (0,00366) desjenigen Volumens zu, das sie bei 0^0 oder der Temperatur des schmelzenden Eises hatte. Man nennt diese Zahl den Ausdehnungscoëfficienten (vgl. §. 3). In Folge dessen, was so eben gesagt wurde, nehmen wir dieses Resultat als für alle Gase giltig an. Wenn also z. B. das betrachtete Gas bei der Temperatur 0^0 ein Volumen von 3000 Liter hat, so wird bei der Temperatur 1^0 sein Volumen 3011 Liter, bei der Temperatur 2^0 3022 Liter, bei der Temperatur 10^0 3110 Liter, bei der Temperatur 100^0 4100 Liter u. s. f. betragen. Daraus folgt alsbald, dass die Spannkraft eines Gases, das sein Volumen nicht ändern kann, für jede Temperaturerhöhung von 1^0 C. um $^{11}/_{3000}$ der Spannkraft wächst, die es bei 0^0 C. hatte.

Bezeichnet α den Ausdehnungscoëfficienten, p den Druck und v das specifische Volumen oder das Volumen der Gewichtseinheit eines Gases bei der Temperatur t^0, so ist nach Obigem der Ausdruck

$$\frac{p\,v}{1+\alpha t} \text{ oder auch } \frac{p\,v}{\frac{1}{\alpha}+t}$$

eine für jedes Gas constante, aber von der Natur desselben abhängige Grösse. Für atmosphärische Luft berechnet sich dieselbe nach folgenden Versuchsresultaten *Regnault's*: Bei $t = 0^0$ C. und bei einem Druck von einer Atmosphäre oder $p = 10334^k$ auf den Quadratmeter ist das Volumen v eines Kilogrammes Luft gleich 0,7733 Cubikmeter. Setzt man noch, wie oben angegeben, $\alpha = 0{,}00366$ oder $\frac{1}{\alpha} = a = 273$ so folgt daraus für atmosphärische Luft

$$\frac{p\,v}{a+t} = 29{,}272.$$

Bezeichnet man allgemein die oben für atmosphärische Luft berechnete Constante mit R, so ist das *Mariotte-Gay-Lussac*'sche Gesetz in der Formel

$$p\,v = \mathrm{R}\,(a+t)$$

ausgedrückt. Man erhält dieses R offenbar für irgend ein Gas, wenn man seinen obigen Werth für atmosphärische Luft mit dem specifischen Gewicht des Gases in Bezug auf jene, beide bei 0^0 C. und unter einem Druck von einer Atmosphäre genommen, dividirt.

§. 307. **Einfluss des Druckes der atmosphärischen Luft auf die Resultate für das Gleichgewicht der Flüssigkeiten.** — Bei allem dem, was wir oben (§§. 275—292) für Flüssigkeiten, welche durch freie Oberflächen begrenzt sind, gesagt haben, wurde vorausgesetzt, dass auf diese Oberflächen keinerlei Druck ausgeübt wird. Die Resultate, zu welchen wir dabei gelangten, sind also nicht unmittelbar für Flüssigkeiten, wie sie sich uns gewöhnlich darbieten, anwendbar, weil die freien Oberflächen dieser Flüssigkeiten gewöhnlich dem Drucke

der atmosphärischen Luft ausgesetzt sind. Wir wollen nun diese verschiedenen Resultate nach einander durchgehen, um diejenigen kennen zu lernen, welche noch richtig bleiben, und bei den anderen die Modifikationen anzugeben, welche sie in Folge des Druckes, welchen die Atmosphäre auf die freien Oberflächen der Flüssigkeiten ausübt, zu erleiden haben.

1) Wenn sich eine schwere Flüssigkeit in einem Gefäss im Gleichgewicht befindet, und es ist ihre freie Oberfläche keinem Druck unterworfen, so ist diese Oberfläche eben und horizontal (§. 275). Dieser Gleichgewichtszustand kann offenbar durch den Druck der atmosphärischen Luft, der mit gleicher Stärke auf die verschiedenen Punkte der freien Oberfläche ausgeübt wird, nicht gestört werden: die freie Oberfläche einer schweren, im Gleichgewicht befindlichen Flüssigkeit ist also noch eben und horizontal, auch wenn diese Oberfläche dem Drucke der atmosphärischen Luft ausgesetzt ist.

2) In dem Falle, wo die freie Oberfläche einer schweren, im Gleichgewicht befindlichen Flüssigkeit dem Drucke der atmosphärischen Luft ausgesetzt ist, ist der Druck in irgend einem Punkte der Flüssigkeitsmasse oder in irgend einem Punkt der Wand des Gefässes, welches die Flüssigkeit enthält, nicht mehr blos dem Gewichte eines Flüssigkeitscylinders gleich, welcher zur Basis die Flächeneinheit und zur Höhe den vertikalen Abstand dieses Punktes von der freien Oberfläche hat (§. 277); sondern er ist gleich diesem Gewichte, vermehrt um den Druck, welchen die atmosphärische Luft auf die Flächeneinheit ausübt.

3) Wenn man den Druck bestimmen will, den eine Fläche von bestimmter Ausdehnung, gegen welche sich eine schwere Flüssigkeit stützt, zu erleiden hat, wie wir das in §. 279 gethan haben, so muss man gleichfalls den Druck der atmosphärischen Luft, welcher auf die freie Oberfläche der Flüssigkeit ausgeübt wird und sich mit gleichmässiger Stärke auf die betrachtete Wand fortpflanzt, berücksichtigen und ihn zu dem hinzufügen, welcher aus dem Gewichte der Flüssigkeit selbst entspringt. Dadurch wird nicht blos der Gesammtdruck vermehrt, sondern es wird auch der Mittelpunkt des Druckes nicht mehr dieselbe Stelle einnehmen als in dem Fall, wo die freie Oberfläche der Flüssigkeit keinen Druck erfährt. Aber wenn man den Gesammtdruck, der auf die betrachtete Wand ausgeübt wird, sowie den Mittelpunkt dieses Drucks zu dem Zwecke bestimmen wollte, um die Grösse und den Angriffspunkt der Kraft kennen zu lernen, welche an der Wand angebracht werden muss, um sie zu ver-

hindern, der Wirkung des Druckes nachzugeben, so müsste man ganz ebenso verfahren, als wenn der Druck der atmosphärischen Luft nicht existiren würde; das auf diese Weise erhaltene Resultat würde die gesuchten Stücke ergeben. Denn wenn sich einerseits der Druck der atmosphärischen Luft, der auf die freie Oberfläche der Flüssigkeit wirkt, mit gleichmässiger Stärke auf den betrachteten Theil der Wand fortpflanzt, so drückt die Luft andererseits mit der nämlichen Stärke auf die entgegengesetzte Seite dieses Wandstücks; diese beiden gleichen und entgegengesetzten Drückungen heben sich also gegenseitig auf, und der Vorgang ist ganz derselbe, als wenn der Druck der atmosphärischen Luft weder auf die eine, noch auf die andere Seite der betrachteten Fläche ausgeübt würde. Es ist also das, was wir im §. 279 in Bezug auf den Druck, welcher auf eine rechteckige Wand ausgeübt wird, gefunden haben, noch richtig, so lange die Untersuchung nur den Zweck hat, die Grösse und den Angriffspunkt der Kraft zu finden, welche an dieser Wand angebracht werden muss, um dem Drucke der Flüssigkeit das Gleichgewicht zu halten.

4) Aehnliche Bemerkungen müssen in Bezug auf das gemacht werden, was wir in den §§. 280 bis 283 gesagt haben. Die Drückungen, von denen wir dort gesprochen haben, müssen blos als diejenigen betrachtet werden, die von der Flüssigkeit allein herrühren; sie sind also noch um diejenigen zu vermehren, welche aus dem Drucke der atmosphärischen Luft entspringen.

5) Wenn die freien Oberflächen einer Flüssigkeit, welche in communicirenden Gefässen enthalten ist, von Seite der atmosphärischen Luft gedrückt werden, so kann das Gleichgewicht doch wieder nur dann stattfinden, wenn diese freien Oberflächen in der nämlichen Horizontalebene liegen. Denn in der That sieht man, dass der Druck auf die bei ab (Fig. 404, S. 573) eingezogene feine Wand von Seite des Gefässes A her gleich ist dem Gewicht einer Flüssigkeitssäule, welche diese Wand zur Grundfläche und die Entfernung ihres Schwerpunkts vom Spiegel der Flüssigkeit in A zur Höhe hat, vermehrt um den Druck der atmosphärischen Luft, der auf die freie Oberfläche der Flüssigkeit im Gefässe A ausgeübt und gleichmässig auf die Wand ab fortgepflanzt wird. In gleicher Weise ist der auf die Wand ab von Seite des Gefässes B her ausgeübte Druck gleich dem Gewicht der Flüssigkeitssäule, welche diese Wand zur Grundfläche und die Entfernung ihres Schwerpunktes vom Niveau im Gefässe B zur Höhe hat, vermehrt um den auf die Oberfläche in B ausge-

übten und auf *ab* gleichmässig fortgepflanzten Druck der atmosphärischen Luft. Diese auf beiden Seiten von *ab* ausgeübten Drückungen sind offenbar gleich, wenn die Oberflächen in den beiden Gefässen in der nämlichen Horizontalebene liegen.

6) Wenn die zwei communicirenden Gefässe zwei Flüssigkeiten von verschiedener Dichtigkeit enthalten, deren Oberflächen dem Drucke der atmosphärischen Luft ausgesetzt sind, so findet man auch jetzt noch, wie in §. 285, dass die Höhen dieser freien Oberflächen über der Horizontalebene, welche durch den Grenzspiegel der beiden Flüssigkeiten hindurchgeht, umgekehrt proportional den Dichtigkeiten dieser Flüssigkeiten sein müssen. Denn der Unterschied der Höhe dieser Oberflächen ist wohl allemal so gering, dass man den Druck der Luft auf dieselben für gleich grosse Flächen von gleicher Stärke, somit in beiden Schenkeln sich aufhebend, voraussetzen kann.

7) Bei allem dem endlich, was wir in Bezug auf die freie Oberfläche einer Flüssigkeit, welche beliebigen Kräften unterworfen ist, sowie in Bezug auf die Kapillarerscheinungen gesagt haben, kann der Druck der atmosphärischen Luft keinerlei Aenderungen in den Resultaten, zu welchen wir gelangt sind, hervorbringen. In der That wird dieser Druck stets in jedem Punkt der freien Oberfläche einer Flüssigkeit in senkrechter Richtung auf diese Oberfläche ausgeübt. Wenn wir den Druck, welchen die atmosphärische Luft auf ein Molekül der Oberfläche ausübt, mit der Resultante der Molekularwirkungen zusammensetzen, welchen dasselbe unterworfen ist, so werden wir dadurch eine Gesammtresultante erhalten, auf welche wir dieselben Schlüsse anwenden können, wie oben auf diejenige der Molekularwirkungen allein (§§. 286 u. 290). Diese Gesammtresultante wird senkrecht oder schief auf der freien Oberfläche der Flüssigkeit stehen, je nachdem die Resultante der Molekularwirkungen selbst senkrecht oder schief auf dieser Fläche ist; wo wir also oben unsere Schlüsse blos auf die Richtung dieser Resultante gründeten, da müssen wir offenbar zu denselben Resultaten gelangen, ob wir den Druck der Luft berücksichtigen oder nicht. Uebrigens muss überhaupt bemerkt werden, dass der Einfluss des Druckes der atmosphärischen Luft stets so gering ist, dass er eine bemerkenswerthe Aenderung der im Obigen (§§. 286 bis 292) erhaltenen Resultate überhaupt nicht hervorbringen kann.

§. 308. **Communicirende Gefässe mit ungleichem Druck auf die freien Oberflächen.** — Wenn eine Flüssigkeit in communicirenden Gefässen in's Gleichgewicht gekommen

ist, und es haben ihre freien Oberflächen keinen Druck zu erleiden, oder es ist der auf sie ausgeübte Druck der atmosphärischen Luft in allen ihren Punkten von gleicher Grösse, so müssen diese freien Oberflächen in der nämlichen Horizontalebene gelegen sein. Aber dies ist nicht mehr so in dem Fall, wo die freien Oberflächen der Flüssigkeit in den communicirenden Gefässen in Berührung mit Gasen stehen, deren Spannkräfte verschieden sind; da die Drückungen, welche von diesen Gasen auf die freien Oberflächen der Flüssigkeit ausgeübt werden, ungleich sind, so folgt, dass diese Oberflächen nicht mehr in gleicher Höhe stehen können; die stärker gedrückte dieser Flächen wird sich unter die andere stellen müssen.

Ein Beispiel hievon hatten wir schon in dem Apparat, welcher uns dazu gedient hat, die Richtigkeit des *Mariotte*'schen Gesetzes nachzuweisen (Fig. 440, S. 614). Wir haben dort gesehen, dass, nachdem Quecksilber in den längeren Schenkel gegossen und die Luft in dem kürzeren Schenkel dadurch zusammengedrückt worden war, die freien Oberflächen des Quecksilbers in beiden Schenkeln ungleich hoch stehen und die Differenz ihrer Höhen gleich dem Unterschiede der Drückungen sein musste, welche sie einerseits von der freien, andererseits von der im kürzeren Schenkel eingeschlossenen atmosphärischen Luft zu ertragen hatten. Man darf nur die Schlüsse, welche wir an jenem Orte gemacht haben, wiederholen, um zu dem ganz allgemeinen Resultat zu gelangen, dass der Unterschied der Höhen der freien Oberflächen einer Flüssigkeit in zwei communicirenden Gefässen gleich ist der Höhe eines Cylinders der betrachteten Flüssigkeit, der zur Basis die Flächeneinheit hat, und dessen Gewicht gleich ist dem Unterschied der Drückungen, welche auf jene beiden freien Oberflächen ausgeübt und auf die Flächeneinheit bezogen werden.

Wenn der Druck auf die eine der beiden freien Oberflächen der Flüssigkeit 100, auf die andere 250 Gramm auf den Quadrat-Centimeter ist, und die Flüssigkeit ist Wasser, so muss die Differenz der Höhen dieser beiden Oberflächen $1^m,50$ sein; denn ein Wassercylinder, dessen Basis 1 Quadrat-Centimeter ist, muss eine Höhe von $1^m,50$ haben, um 150 Gramm schwer zu sein. Wenn, als Flüssigkeit immer Wasser vorausgesetzt, die Drückungen auf ihre beiden freien Oberflächen einerseits eine halbe, andererseits drei Atmosphären betragen, so muss die erstere Oberfläche $25^m,82$ über der zweiten liegen; denn damit das Gewicht eines Wassercylinders, dessen Basis ein Quadrat-Centimeter

ist, zwei und ein halb mal $1^k,033$ (§. 301) oder $2^k,582$ wiegt, muss er eine Höhe von $25^m,82$ haben.

§. 309. Wenn man das eine Ende einer Glasröhre in ein Gefäss, welches Wasser enthält, taucht und an dem anderen Ende mit dem Munde saugt, so sieht man alsbald das Wasser in der Röhre in die Höhe steigen, und zwar um so höher, je stärker man saugt. Diese Erscheinung ist nichts Anderes, als eine Folge des Gesetzes, welches wir in dem vorhergehenden Paragraphen angegeben haben. Wenn man den Mund an das Ende der Röhre ansetzt, sodass alle Verbindung des Innern dieser Röhre mit der äusseren Luft unterbrochen ist, so communicirt die darin enthaltene Luft frei mit derjenigen, welche in dem Mund und in den Lungen vorhanden ist, und bildet mit dieser eine abgeschlossene Luftmasse, die, so zu sagen, in einem von allen Seiten geschlossenen Gefäss enthalten ist. Das Saugen ist nun nichts Anderes, als eine Ausdehnung des Raumes, welchen die Luft in den Lungen einnimmt; es wird folglich dadurch der abgeschlossenen Luftmasse, von der wir eben gesprochen haben, ein grösserer Raum dargeboten, und indem sie ihr Volumen vergrössert, vermindert sich ihre Spannkraft in entsprechendem Grade. Der Druck, welchen die Luft in der Röhre auf die Oberfläche des Wassers, mit welcher sie in Berührung ist, ausübt, wird somit kleiner, als er vorher war, d. h. also kleiner als der Druck der atmosphärischen Luft; und da dieser letztere ausserhalb der Röhre fortwährend mit gleicher Stärke wirkt, so folgt, dass die Oberfläche des Wassers innerhalb der Röhre schwächer gedrückt wird als aussen. Dadurch wird aber eine Erhebung der Flüssigkeit in der Röhre hervorgebracht, die um so bedeutender werden muss, je grösser die Differenz der Drückungen auf die beiden freien Oberflächen ist, d. h. je stärker gesaugt wird.

Das Saugen mit dem Munde kann niemals eine bedeutende Erhebung des Wassers in der Röhre hervorbringen. Aber wenn man anstatt dessen die Röhre, die wir als sehr lang voraussetzen, mit einer Luftpumpe in Verbindung setzt und nach und nach die Luft daraus entfernt, so sieht man das Wasser immer mehr darin in die Höhe steigen. Man wird jedoch alsbald bemerken, dass dieses auf solche Weise durch Saugen hervorgebrachte Steigen des Wassers in der Röhre eine gewisse Grenze niemals überschreiten kann. Denn im höchsten Falle kann durch dieses Saugen ein vollständig luftleerer Raum im Innern der Röhre erreicht werden; die Differenz der Drückungen auf die freien Oberflächen in und ausser der Röhre kann die Grösse des Druckes

der Luft niemals übersteigen, und folglich wird der Unterschied der Höhen jener beiden Oberflächen nicht grösser als die Höhe einer Wassersäule werden können, die dem Drucke der atmosphärischen Luft, wie er in dem Augenblick, in dem das Experiment gemacht wird, eben stattfindet, das Gleichgewicht zu halten im Stande ist. Wenn in diesem Augenblick die Höhe des Barometerstandes $0^m,76$ betrüge, so könnte sich das Wasser in der Röhre nicht höher als $10^m,33$ über die äussere Oberfläche erheben. Wenn das Experiment auf einem hohen Berg gemacht würde, wo die Höhe des Barometerstandes viel weniger beträgt, so würde die Grenze, bis zu welcher das Wasser in der Röhre durch Saugen gehoben werden kann, weit unter $10^m,33$ liegen.

§. 310. Wenn man die Spannkraft der Luft, welche mit einer der freien Oberflächen des Wassers, welches in communicirenden Gefässen enthalten ist, in Berührung steht, anstatt sie durch Saugen zu vermindern, auf irgend eine Art erhöht, so wird dadurch eine Veränderung der Spiegel im entgegengesetzten Sinne hervorgebracht; die freie Oberfläche, welche auf diese Weise einem stärkeren Druck ausgesetzt wird, senkt sich, während sich die andere um eine entsprechende Grösse erhebt. Es sei z. B. A (Fig. 441) ein vollständig geschlossener Kasten, der Wasser enthält, welches frei in die Röhre B übertreten kann, die in der Nähe des Bodens in das Gefäss A einmündet; dieses Wasser wird offenbar im Kasten und in der Röhre gleich hoch stehen, so lange die Drückungen, welche seine Oberflächen zu tragen haben, von gleicher Grösse sind. Wenn man aber, während in der Röhre B fortwährend die freie atmosphärische Luft drückt, in den Kasten A durch die Röhre C auf eine Art und Weise, von der wir später

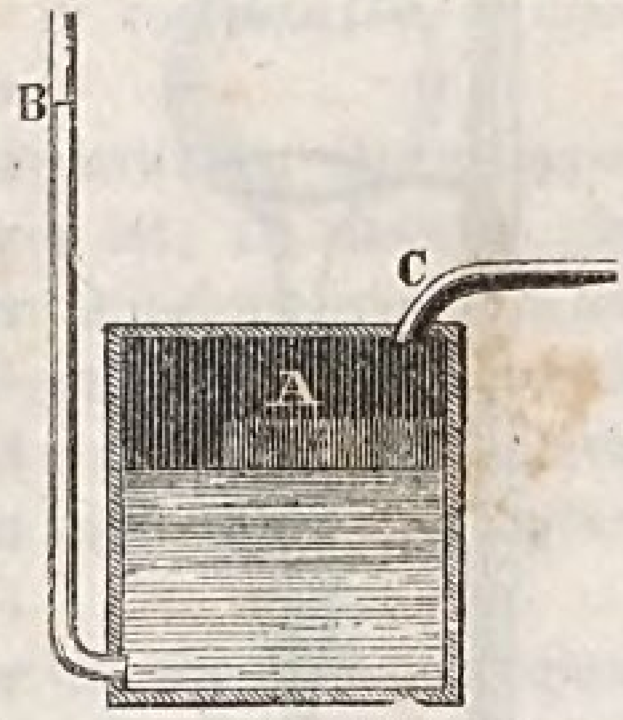


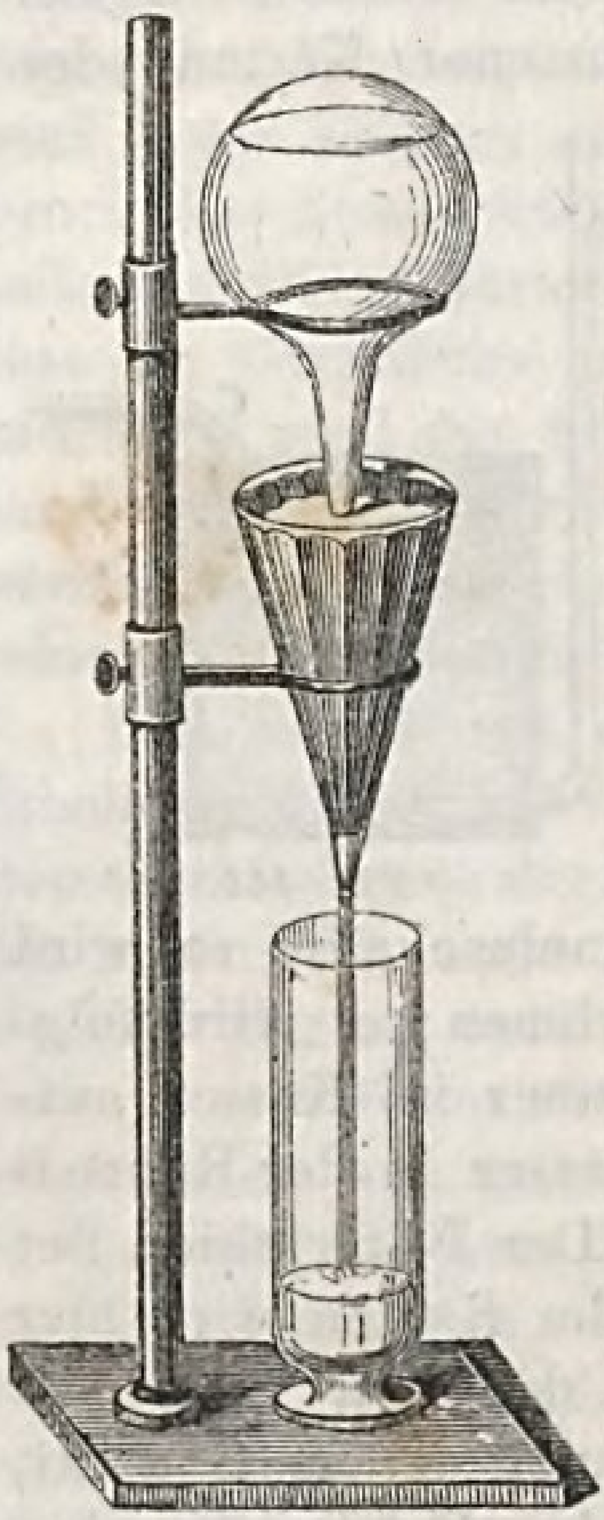
Fig. 441.

sprechen werden, mehr und mehr Luft hineinschafft, so wird die Spannkraft dieser Luft fortwährend zunehmen; es wird folglich auch der Druck, den sie auf das Wasser im Kasten ausübt, immer grösser und grösser, und das Wasser in der Röhre B muss mehr und mehr in die Höhe steigen. Der Unterschied des Niveau's des Wassers in der Röhre und im Kasten wird hier durch die Differenz zwischen dem Drucke der Luft in A und dem Drucke der freien atmosphärischen Luft, der in B wirkt, bestimmt; und da die erste von diesen beiden Drückungen be-

liebig wachsen kann, so folgt, dass die Höhe, bis zu welcher sich das Wasser in der Röhre B erhebt, gleichfalls eine beliebige Grösse erhalten kann. Die Höhe der Oberfläche des Wassers in der Röhre B über der Oberfläche des Wassers im Gefässe A muss offenbar so oftmal $10^m,33$ betragen, als der Ueberschuss des Druckes der Luft in A über den Druck der atmosphärischen Luft Atmosphären enthält (§. 301).

Es wird gut sein, nochmals auf den wesentlichen Unterschied, der zwischen der Erhebung des Wassers durch Saugen und der Erhebung durch ausgeübten Druck besteht, aufmerksam zu machen. Im ersten Fall ist die grösste Höhe, welche das Wasser erreichen kann, gleich der Höhe einer Wassersäule, welche dem Drucke der atmosphärischen Luft das Gleichgewicht hält ($10^m,33$ bei $0^m,76$ Barometerstand); in dem zweiten Fall dagegen kann das Wasser auf jede beliebige Höhe gehoben werden.

§. 311. **Mittel, ein constantes Niveau zu erhalten.** Es ist häufig nothwendig, die Oberfläche der Flüssigkeit in einem Gefäss, wenn sich dieselbe, sei es durch Ausfliessen der Flüssigkeit durch eine unten angebrachte Oeffnung, sei es durch Verdampfen oder Verdunsten, fortwährend zu senken sucht, in constanter Höhe zu erhalten; man kann hiezu das folgende Mittel anwenden, dessen man sich besonders bei chemischen Arbeiten bedient, um eine etwas grössere Menge Flüssigkeit zu filtriren. Ueber dem Gefäss, in welchem man ein constantes Niveau erhalten will (Fig. 442) [dieses Gefäss ist hier ein Trichter, welcher ein Papierfilter enthält], bringt man ein anderes mit enger, nach unten gekehrter Oeffnung an; dieses zweite Gefäss wird vorher mit Flüssigkeit gefüllt, welche nach und nach in das erste Gefäss herabfliessen und die aus diesem entfernte Flüssigkeit ersetzen soll. Die Oeffnung dieses zweiten Gefässes befindet sich genau in der Höhe, in welcher man das constante Niveau in dem ersten erhalten will. Da dieses zweite Gefäss oben geschlossen ist, so kann die Flüssigkeit nicht aus demselben ausfliessen, so lange seine Oeffnung unten auch nur noch ein wenig unter den Spiegel der Flüssigkeit im unteren Gefäss taucht.


Fig. 442.

Durch vorhergegangenen Ausfluss einer gewissen Menge Flüssigkeit aus dem oberen Gefäss hat sich nämlich die über dem Spiegel der Flüssigkeit in diesem Gefäss abgesperrte Luft etwas ausgedehnt und dadurch eine geringere Spannkraft angenommen. Sie ist folglich nicht mehr im Stande, dem Drucke der atmosphärischen Luft auf dem Spiegel im unteren Gefäss das Gleichgewicht zu halten, und dieser letztere Druck ist es, welcher die Flüssigkeit im oberen Gefässe zurückhält. Wenn der Spiegel der Flüssigkeit im unteren Gefäss mehr und mehr herabsinkt und auf diese Weise endlich die Oeffnung des oberen Gefässes frei macht, so dringt eine Luftblase durch diese Oeffnung ein und steigt in die Höhe, während eine entsprechende Quantität Flüssigkeit aus dem oberen in das untere Gefäss herabfliesst. Das Niveau in letzterem wird also etwas gehoben; wenn es sich wieder senkt, so öffnet es einer neuen Luftblase den Durchgang, welche in das obere Gefäss eintritt und eine neue Quantität Flüssigkeit aus demselben verdrängt u. s. f. Es ist klar, dass auf diese Weise das Niveau der Flüssigkeit im unteren Gefäss so lange in constanter Höhe erhalten wird, als sich in dem oberen Gefäss noch ein Theil der Flüssigkeit befindet, die anfangs in dasselbe gebracht worden ist.

Dasselbe Mittel wendet man bei einer gewissen Art von Oellampen an, um das Oel in denselben in constantem Niveau zu erhalten.

§. 312. **Manometer.** — Um die Spannung eines Gases, das in einem geschlossenen Raum enthalten ist, zu messen, bedient man sich der Apparate, welche im Allgemeinen *Manometer* genannt werden. Diejenigen dieser Apparate, welche hier angegeben werden sollen, theilt man in zwei verschiedene Arten: in *Manometer mit freier Luft* und in *Manometer mit verdichteter Luft.*

Ein Manometer mit freier Luft ist eine doppelt gebogene, mit Flüssigkeit gefüllte Röhre, ähnlich der in Fig. 408, S. 575. Der eine Schenkel steht mit dem Gase, dessen Spannung gemessen werden soll, der andere mit der freien Luft in Verbindung. Der Ueberschuss der Spannkraft des Gases über die der atmosphärischen Luft veranlasst ein Steigen der Flüssigkeit (welche hier meist Quecksilber ist) in dem anderen Schenkel; und das Verhältniss, welches zwischen dem Unterschied der Höhen der freien Oberflächen der Flüssigkeit im Manometer und dem Barometerstande stattfindet, gibt die Zahl der Atmosphären an, um welche die zu messende Spannkraft die der atmosphärischen

Luft übertrifft. Demnach ist, wenn die Differenz der Höhen der Quecksilberspiegel im Manometer 0m,76 beträgt, der gesuchte Druck des Gases 2 Atmosphären; wenn diese Differenz 2mal 0m,76 beträgt, so ist die Spannung des Gases 3 Atmosphären u. s. f. Neben dem Schenkel des Manometers, in welchem das Quecksilber durch den Druck des Gases in die Höhe getrieben wird, ist ein Maassstab befestigt; die Eintheilung desselben ist so gemacht, dass sie unmittelbar die Grösse des zu messenden Gasdruckes in Atmosphären und zehntels Atmosphären angibt; man darf also nur zusehen, an welcher Stelle dieses Maassstabes die freie Oberfläche des Quecksilbers steht, um den gesuchten Druck unmittelbar zu erhalten.

§. **313.** Die Einrichtung der Manometer mit verdichteter Luft ist ähnlich derjenigen der Manometer mit freier Luft; nur ist der Schenkel *c* (Fig. 443), in welchem der Druck des Gases das Quecksilber in die Höhe treibt, oben geschlossen, anstatt wie bei den Manometern mit freier Luft offen zu sein. Dadurch ist in diesem Schenkel eine gewisse Quantität Luft abgesperrt, welche sich dem Ansteigen des Quecksilbers entgegenstellt und dadurch verhindert, dass es sich bei demselben Druck des Gases in *ab* so hoch erhebt wie im Manometer mit freier Luft; denn in dem Maasse als das Quecksilber in *c* steigt, muss es die Luft, welche sich über ihm befindet, zusammendrücken und folglich ihre Spannkraft erhöhen; diese Spannkraft aber, vermehrt um den Druck, welcher durch die Differenz der Quecksilberspiegel in beiden Schenkeln hervorgebracht wird, muss dem Drucke des Gases im Schenkel *b* das Gleichgewicht halten. Wenn die in *c* eingeschlossene Luft z. B. auf die Hälfte ihres Volumens, das sie unter dem Drucke der freien atmosphärischen Luft einnahm, reducirt worden ist, so ist ihre Spannkraft verdoppelt worden; der in *b* ausgeübte Druck wird also zwei Atmosphären, mehr dem Bruchtheile einer Atmosphäre betragen, welcher dem Unterschied der Höhen der Quecksilberspiegel in *b* und *c* entspricht. Die Röhre *c* wird vorher so eingetheilt, dass an der Stelle, wo sich der Quecksilberspiegel in dieser Röhre in Folge des Druckes des Gases im Schenkel *b* befindet, die gesuchte Spannung dieses Gases unmittelbar abgelesen werden kann.

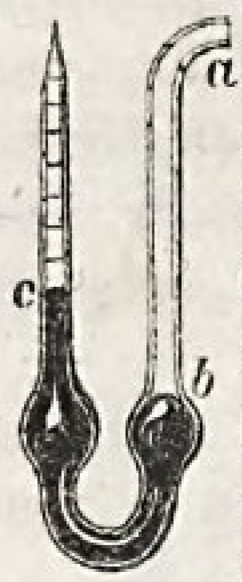


Fig. 443.

Damit ein Manometer mit comprimirter Luft die Spannkraft des Gases, mit welchem es in Verbindung gesetzt ist, immer richtig angibt, ist es nothwendig, dass die Temperatur der in der

Manometerröhre eingeschlossenen Luft stets dieselbe bleibt wie diejenige, bei welcher das Manometer graduirt wurde. Wir haben in der That oben (§. 306) gesehen, dass die Aenderungen der Temperatur einen sehr merkbaren Einfluss auf die Spannkraft einer Gasmasse ausüben, welche dasselbe Volumen behält. Wenn ein Manometer mit comprimirter Luft in einer Temperatur gebraucht wird, die ziemlich von der verschieden ist, bei welcher es eingetheilt wurde, so wird es allemal nur sehr ungenaue Messungen liefern können.

§. 314. **Zusammendrückbarkeit der tropfbaren Flüssigkeiten.** — Wenn man eine gewisse Menge Flüssigkeit, die in einem vollständig geschlossenen Gefäss enthalten ist, einem sehr starken Drucke aussetzt, so erfährt sie eine Verminderung ihres Volumens, die aber so klein ist, dass man die tropfbar flüssigen Körper lange Zeit für absolut unzusammendrückbar gehalten und ihnen daher auch den Namen unzusammendrückbare Flüssigkeiten, im Gegensatz zu den elastischen Flüssigkeiten oder Gasen, gegeben hat. Wenn bei den Versuchen, welche man zum Beweis der Zusammendrückbarkeit der Flüssigkeiten anstellt, der Kolben, mittelst dessen auf die Oberfläche der Flüssigkeit ein Druck ausgeübt wird, im Sinne dieses Druckes um eine gewisse Grösse fortschreitet, so dringt er wohl ein wenig in das Innere des von allen Seiten geschlossenen Gefässes, welches die Flüssigkeit enthält, ein; aber diese scheinbare Verminderung des Volumens der Flüssigkeit könnte auch allein von der Ausdehnung der Gefässwände herrühren, welche durch den grossen Druck, den sie von Seite der Flüssigkeit erfahren, hervorgebracht wird. Man wird desshalb zu einem sicheren Resultat nur dann gelangen, wenn man diese Ausdehnung der Wände mittelst eines Druckes, welchen man an ihren äusseren Flächen anbringt, und der im Stande ist, dem inneren Drucke das Gleichgewicht zu halten, verhindert. Dies war der Gedanke, welcher *Oerstedt* zur Anwendung des folgenden, Piezometer genannten Apparates führte.

Ein Glasgefäss *a* (Fig. 444) ist von allen Seiten geschlossen, ausgenommen an seinem obersten Theil, wo eine Röhre *b* von kleinem Durchmesser an dasselbe angeschmolzen ist. Man füllt das Gefäss und die Röhre mit Wasser und bringt dabei zugleich in die letztere eine kleine Menge Quecksilber, das dazu bestimmt ist, als Index zu dienen. Das Ganze wird hierauf in einen Behälter A, gleichfalls von Glas, gestellt, der vollständig mit Wasser gefüllt ist. Dieser Behälter ist oben durch einen Kolben B voll-

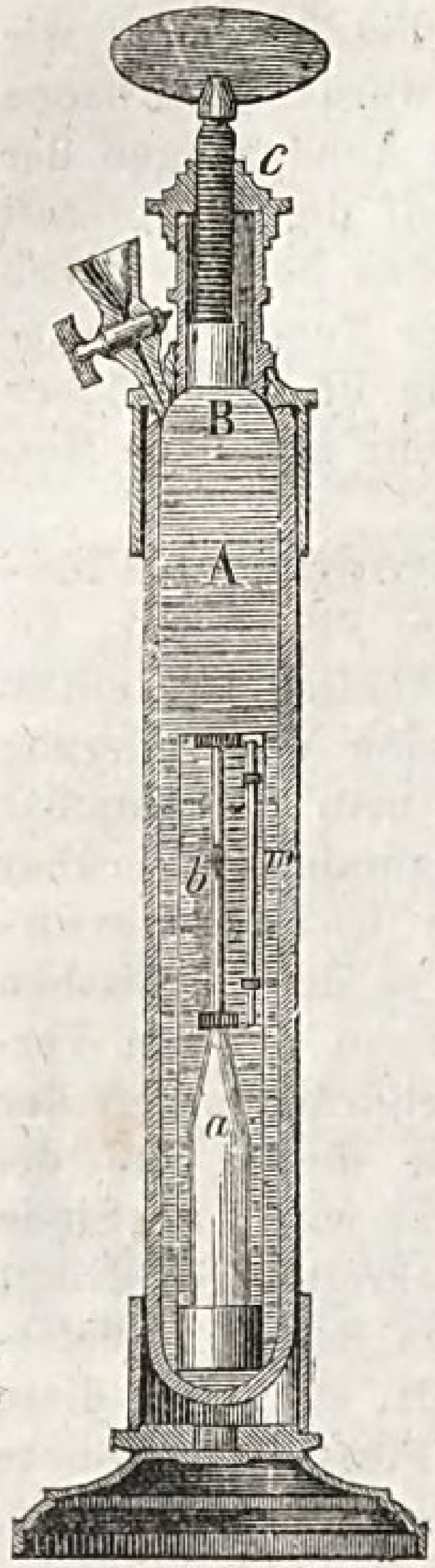


Fig. 444.

kommen luft- und wasserdicht geschlossen; die Stange dieses Kolbens, die eine Schraubenspindel bildet, geht durch den Deckel C, in welchem eine Schraubenmutter eingeschnitten ist, und endigt sich in einen Handgriff, mittelst dessen man sie in dieser Schraubenmutter drehen kann. Die Befestigung dieser Stange an dem Kolben ist so eingerichtet, dass sich die Stange drehen kann, ohne den Kolben in diese Bewegung mit hineinziehen zu müssen. Wenn man daher auf den Handgriff so wirkt, dass der Kolben B in dem Behälter A abwärts geht, so erfährt das Wasser in dem letzteren einen Druck von Seite des Kolbens. Dieser Druck pflanzt sich auf das Gefäss *a* und auf die Flüssigkeit, welche es enthält, fort, und man sieht in Folge dessen den Quecksilberindex in der Röhre *b* sinken. Wenn sich der innere Rauminhalt des Gefässes *a* und des Theils der Röhre *b*, welcher sich unter dem Quecksilberindex befindet, durch den ausgeübten Druck vergrössern könnte, so würde diese Senkung des Index noch nicht beweisen, dass das in dem Gefäss *a* enthaltene Wasser zusammengedrückt worden ist. Aber dem ist nicht so. Das Gefäss *a* wird von aussen nach innen ebenso stark gedrückt als von innen nach aussen. Diese Drückungen können also höchstens eine Verminderung der Dicke der Wände des Gefässes hervorbringen, die aber bei der geringen Zusammendrückbarkeit des Glases und der geringen Dicke, die diese Wände besitzen, meist vernachlässigt werden darf; die Senkung des Quecksilberindex kann also sicher nur von einer Verminderung des Volumens der im Gefäss *a* enthaltenen Flüssigkeit herrühren und beweist somit die Zusammendrückbarkeit derselben.

Neben dem Gefäss *a* ist eine oben geschlossene, unten offene Glasröhre *m* befestigt und nach gleichen Volumtheilen ihres Inhalts graduirt. Diese Röhre ist vollständig mit Luft gefüllt, wenn das Wasser im Behälter A nur einem Drucke gleich dem der atmosphärischen Luft ausgesetzt ist. Der Druck, welcher durch das Senken des Kolbens B hervorgebracht wird, veranlasst eine Verminderung des Volumens dieser Luft, das nach dem *Mariotte*'-

schen Gesetz im umgekehrten Verhältniss zu diesem Drucke steht; das Wasser steigt in der Röhre *m*, und die Stelle, bis zu welcher sich sein Spiegel erhebt, hängt von der Grösse des ausgeübten Druckes ab und kann folglich als Maass desselben dienen. Diese Röhre *m* ist offenbar nichts Anderes als ein Manometer mit verdichteter Luft.

Genaue Versuche, welche von *Regnault* mittelst eines Apparates angestellt wurden, der ein wenig verschieden von dem war, den wir soeben angegeben haben, führten zu folgenden Resultaten: Das Volumen einer Wassermasse vermindert sich für jede Atmosphäre, um welche der Druck, der auf sie ausgeübt wird, zunimmt, um 0,000048; d. h. wenn eine Wassermasse, deren Volumen, wenn sie keinen Druck erleidet, eine Million Liter beträgt, einem Druck von 1, 2, 3 Atmosphären ausgesetzt wird, so vermindert sich ihr Volumen um bezüglich 48, oder 2mal 48 oder 3mal 48..... Liter. Das Volumen einer Quecksilbermasse vermindert sich für jede Atmosphäre, um welche sich ihr Druck vermehrt, um 0,0000035.

§. 315. **Gleichgewicht der flüssigen und luftförmigen Körper, deren verschiedene Theile ungleiche Temperatur besitzen.** — Wir haben oben gefunden, dass die flüssigen wie die luftförmigen Körper, wenn sie allein der Wirkung der Schwere ausgesetzt sind, nur im Gleichgewicht sein können, wenn die Spannungen in allen Punkten, die in der nämlichen Horizontalebene gelegen sind, dieselbe Grösse haben (§§. 269 und 295). Diese Bedingung kann nur erfüllt sein, so lange die Temperatur in diesen Punkten ebenfalls die nämliche ist. Setzen wir voraus, dass die Flüssigkeits- oder Gasmasse, welche wir betrachten, durch eine grosse Zahl von Horizontalebenen, die in kleinen Entfernungen von einander durch sie gelegt gedacht werden, in lauter dünne Schichten zerlegt werde und sehen wir, was stattfinden müsste, wenn die Temperatur nicht überall, in der ganzen Ausdehnung einer jeden dieser Schichten die nämliche wäre. Wir wissen, dass bei dem nämlichen Druck die Dichtigkeit eines flüssigen oder gasförmigen Körpers, abgesehen von einigen Ausnahmen, um so geringer wird, je höher seine Temperatur ist. Die Dichtigkeit der Flüssigkeit oder des Gases würde also wie die Temperatur, in jeder von unseren Schichten veränderlich sein; und wenn daher auch die Drückungen in allen Punkten der oberen Begrenzungsfläche irgend einer dieser Schichten gleich wären, so wäre dies sicher schon nicht mehr in den Punkten der Horizontalebene der Fall, durch welche diese Schichte auf

ihrer untern Seite begrenzt ist: denn der Unterschied der Drückungen in zwei Punkten, die in einer und derselben Vertikalen auf den Begrenzungsflächen dieser Schichte gelegen sind, ist gleich dem Gewichte einer Flüssigkeits- oder Gassäule, welche zwischen diesen beiden Punkten enthalten ist; und diese Gewichte wären unserer Voraussetzung nach an den verschiedenen Stellen der Schichte nicht die nämlichen. Die Ungleichheit der Temperatur in den verschiedenen Punkten einer und derselben Horizontalschichte verträgt sich also nicht mit dem Gleichgewicht der flüssigen oder luftförmigen Körper, da nothwendig daraus folgen würde, dass in Punkten, die in der nämlichen Horizontalebene gelegen sind, ungleiche Drückungen stattfänden. Eine schwere Flüssigkeits- oder Gasmasse, die in ihren verschiedenen Theilen ungleiche Temperatur besitzt, kann also nur im Gleichgewicht sein, wenn jede der Horizontalschichten, aus denen sie bestehend gedacht werden kann, durchweg die nämliche Temperatur hat. Diese Schichten werden sich so übereinander lagern, als wenn sie von ebensoviel Flüssigkeiten von verschiedener Dichtigkeit gebildet würden, die sich nach §. 283 im Gleichgewichtszustande so übereinander stellen, dass ihre Trennungsflächen eben und horizontal sind. Da ausserdem für die Stabilität des Gleichgewichts erfordert wird, dass die Dichtigkeit wenigstens nicht zunimmt, wenn man von einer Schichte in eine höher gelegene übergeht, so sieht man, dass im Allgemeinen die Temperatur in dem Maasse zunehmen muss, als man sich in der Flüssigkeits- oder Gasmasse erhebt.

Dieses letztere Resultat erleidet einige Ausnahmen. Die Dichtigkeit des Wassers, welche im Allgemeinen mit zunehmender Temperatur abnimmt, wächst im Gegentheil, wenn die Temperatur von 0^0 bis $4^0,1$ C. steigt (vgl. §. 3). Desshalb hat das Wasser seine grösste Dichtigkeit nicht bei 0^0 sondern bei $4^0,1$, und in einer Wassermasse, deren Temperatur unter $4^0,1$ liegt, befinden sich also die kälteren Schichten oben, die wärmeren unten; bis 0^0 erkaltet muss sie folglich auf ihrer Oberfläche zuerst gefrieren, und darin liegt der Grund, warum sich das Wasser in einem Gefässe oder in einem Teiche zuerst mit einer dünnen Eisschichte überzieht, die nur allmählich dicker wird, während es in grösseren Tiefen gar nicht, oder nur bei ausserordentlicher Erkältung erstarrt. — Wenn eine Gasmasse von durchaus gleicher Temperatur im Gleichgewicht ist, so besitzen die obersten Schichten eine geringere Dichtigkeit als die unteren (§. 296). Es ist also klar, dass die obersten Schichten etwas erkalten können, ohne

dass ihre Dichtigkeit, die mit der Abnahme der Temperatur fortwährend zunimmt, grösser wird als die der unter ihnen gelegenen Schichten; das Gleichgewicht kann also möglicherweise noch fortbestehen und stabil bleiben, obgleich die Temperatur abnimmt, wenn man von einer Schichte in eine höher gelegene übergeht. Dieser letztere Fall findet in der Atmosphäre der Erde in der That statt. Die Dichtigkeiten der Horizontalschichten, in welche man sich eine Luftsäule, die sich in vertikaler Richtung durch die ganze Höhe der Atmosphäre erstreckt, zerlegt denken kann, nehmen von unten nach oben stetig ab, trotzdem, dass die Temperatur immer geringer wird, je höher man sich erhebt.

§. **316.** Wenn eine Flüssigkeit in einem Gefäss im Gleichgewicht ist, und man erwärmt einen Theil der Seitenwände oder den Boden dieses Gefässes, so theilt sich die Wärme, indem sie diese Wände durchdringt, der Flüssigkeit mit, und das Gleichgewicht wird gestört. Die erwärmte Flüssigkeit steigt in die Höhe und wird durch andere Theile der Flüssigkeit ersetzt, die sich nun ihrerseits erwärmen und aufsteigen u. s. f.; es findet also eine fortdauernde Circulation statt, welche nach und nach die verschiedenen Theile der Flüssigkeit mit den erhitzten Wänden in Berührung bringt und auf diese Weise eine stetig fortschreitende Erhöhung der Temperatur in der ganzen Flüssigkeitsmasse veranlasst. Wenn die Flüssigkeit blos von oben erwärmt würde, so würde die Circulationsbewegung nicht hervorgebracht werden, und die Wärme würde sich nur ausserordentlich langsam durch die ganze Flüssigkeitsmasse verbreiten. Man kann die Bewegung, welche in einer Wassermasse, die in einem Gefässe enthalten ist, durch die Erwärmung der Wände dieses Gefässes hervorgebracht wird, sichtbar machen, indem man eine kleine Quantität Sägespäne in die Flüssigkeit bringt, deren Theilchen an der Bewegung des Wassers Theil nehmen.

Aehnliche Bewegungen werden in einer im Gleichgewicht befindlichen Gasmasse hervorgebracht, wenn man einen Theil der Wände, von denen dieses Gas eingeschlossen ist, oder überhaupt einen Körper, mit dem es in Berührung steht, erwärmt. Wenn man in einem Ofen, dessen Rauchrohr sich inmitten der Luft, welche im Zimmer enthalten ist, vertikal erhebt, Feuer macht, so erwärmt sich dieses Rohr und mit ihm die Theile der Luft, mit denen es in Berührung steht; diese Lufttheilchen setzen sich dadurch in Bewegung, und auf diese Weise bildet sich rings um die Röhre ein continuirlicher, aufsteigender Luftstrom, der so lange dauert, als das Rohr wärmer als die Luft ist, welche

es umgibt. Dieser Luftstrom wird sichtbar, wenn das Sonnenlicht auf das Rohr fällt und den Schatten desselben auf eine benachbarte Wand wirft; man sieht zu beiden Seiten des Schattens der Röhre leichte, wolkige Schatten mit grosser Geschwindigkeit in die Höhe steigen. Diese Schatten werden durch das Spiel des Lichtes in der bewegten Luft in Folge der Aenderungen in der Dichtigkeit derselben, welche durch die Bewegung selbst hervorgerufen werden, hervorgebracht. Aber man kann den aufsteigenden Luftstrom auch noch auf andere Weise bemerklich machen. Man befestigt nämlich an dem Rohr einen aufwärts gebogenen Eisendraht (Fig. 445) und setzt auf die Spitze desselben einen Streifen Papier, der sich rings um den Drath schraubenförmig herabsenkt. Indem die Luft in ihrer aufsteigenden Bewegung gegen die nach unten gekehrte Fläche dieses Papierstreifens, die sich durchweg in schiefer Richtung ihrer Bewegung entgegenstellt, anstösst, theilt sie demselben eine Rotationsbewegung um die Vertikale mit, welche durch seinen Unterstützungspunkt hindurchgeht.

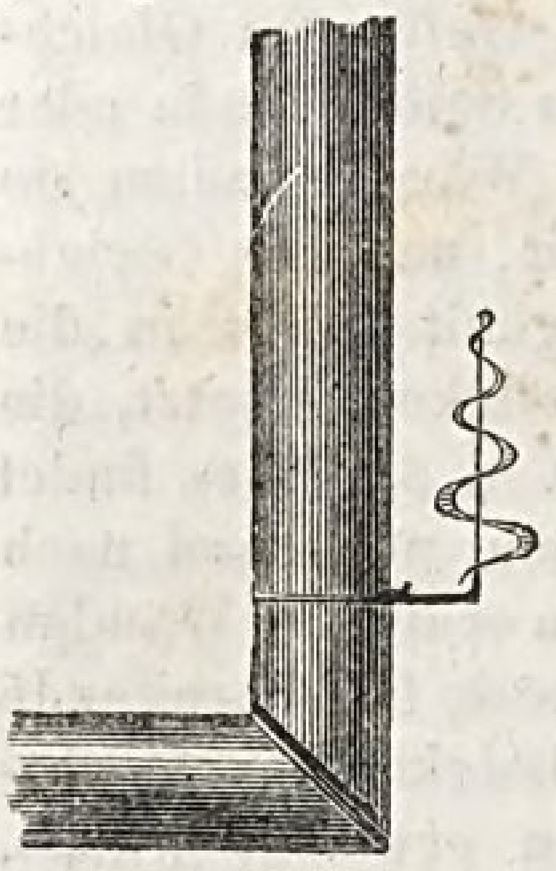


Fig. 445.

Die Bewegungen der atmosphärischen Luft, d. h. die Winde, entspringen daraus, dass gewisse Theile der Atmosphäre ihre Dichtigkeit ändern und doch die nämliche Spannung behalten, sodass das Gleichgewicht nicht fortbestehen kann; die Luft setzt sich in Bewegung, um eine andere Anordnung herbeizuführen, bei welcher das Gleichgewicht wieder hergestellt ist. Wenn die Ursache, welche die Störung des Gleichgewichts hervorgebracht hat, fortdauert, so dauert die Bewegung der Luft gleichfalls fort. Die Aenderungen der Dichtigkeit, welche diese Bewegungen hervorrufen, werden theils durch Aenderungen der Temperatur, theils durch die Gegenwart einer grösseren oder geringeren Menge von Wasserdampf hervorgebracht, welcher immer in der atmosphärischen Luft vorhanden ist.

§. 317. **Luftwechsel in Bergwerken.** — Es kommt häufig vor, dass ein mit Luft gefüllter Raum auf mehrere verschiedene Arten mit der freien Atmosphäre in Verbindung steht; so communicirt die Luft, welche in einem Zimmer enthalten ist, durch die Ritzen der Thüren und Fenster, durch die Schornsteine u. s. f. mit der äusseren Luft. Unter diesen Umständen können, wie wir sogleich sehen werden, die Temperaturunter-

schiede in verschiedenen Punkten noch Luftströmungen hervorbringen, die zum Zwecke des Wechsels der Luft genügen.

Betrachten wir zunächst den Vorgang, welcher stattfindet, wenn eine unterirdische Höhlung, der Stollen eines Bergwerks z. B., mit der atmosphärischen Luft durch zwei vertikale Schächte (Fig. 446) in Verbindung steht. Für das Gleichgewicht der Luft, sowohl der äusseren, als der im Innern des Stollens enthaltenen, ist es erforderlich, dass der Druck in allen Punkten derselben Horizontalebene, welche durch das Innere irgend eines mit Gas erfüllten Raumes hindurch gelegt wird, dieselbe Grösse habe. Die Drückungen in A und B müssen also, ebenso wie die in C und D, einander gleich sein. Aber der Unterschied der Drückungen in A und C ist gleich dem Gewichte der Luftsäule A C, deren Grundfläche die Flächeneinheit ist; ebenso ist der Unterschied der Drückungen in B und D gleich dem Gewichte der Luftsäule BD: die Gewichte der beiden Luftsäulen AC und BD müssen folglich einander gleich sein. Diese Bedingung ist erfüllt: 1) wenn die Temperatur überall in der ganzen Luftmasse die nämliche ist; oder 2) wenn sich die Temperatur längs der beiden Luftsäulen AC und BD auf gleiche Weise ändert; oder 3) wenn sich die Aenderungen in der Dichtigkeit, welche aus den Verschiedenheiten der Temperaturen längs dieser beiden Luftsäulen hervorgehen, auf beiden Seiten compensiren. Aber es wird sehr selten vorkommen, dass die Verhältnisse so sind, wie es diese Bedingungen erfordern. Gewöhnlich werden die Gewichte der Luftsäulen AC und BD ungleich gross sein, und da dann das Gleichgewicht nicht stattfinden kann, so entsteht eine Bewegung, in Folge deren die Luft in dem einen der beiden vertikalen Schächte herab- und in dem anderen wieder hinaufsteigt.

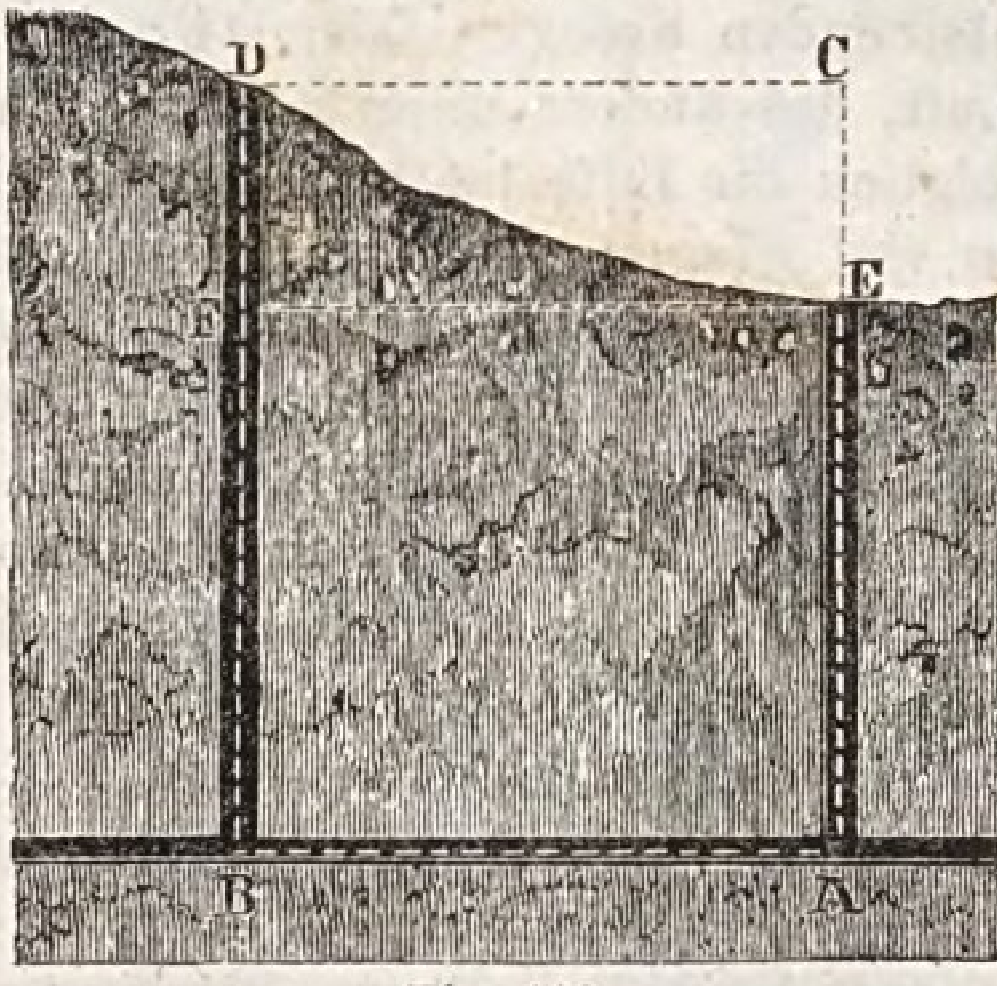


Fig. 446.

Setzen wir voraus, dass die Mündungen E, D der beiden Schächte, wie es Fig. 446 zeigt, nicht in gleicher Höhe gelegen seien. Dieser einzige Umstand schon reicht aus, um einen fortdauernden Luftstrom in das Innere des Stollens und wieder aus demselben heraus hervorzubringen, welcher Luftstrom im Sommer

die entgegengesetzte Richtung als im Winter hat. Bekanntlich ist nämlich die Temperatur im Innern der Erde schon in geringer Tiefe, etwa 24^m unter der Oberfläche derselben, das ganze Jahr hindurch constant, und zwar im Sommer niedriger und im Winter dagegen höher als die Temperatur der atmosphärischen Luft. Die Temperaturen der Stücke AE und BF unserer beiden Luftsäulen, die unter der Horizontalebene gelegen sind, welche durch die tiefste der Mündungen der beiden Schächte gelegt ist, können als gleich vorausgesetzt werden, weil die Wände, mit denen diese Stücke in Verbindung sind, nahezu dieselbe Temperatur haben. Aber dies ist nicht mehr so bei den übrig bleibenden Stücken CE, DF; das erstere befindet sich in freier Luft, das andere unterhalb der Erdoberfläche. Im Sommer wird folglich die Luftsäule CE wärmer sein als die DF und also nicht so viel wiegen als diese; die Verschiedenheit der Gewichte der ganzen Luftsäulen AC und BD bringen also eine aufsteigende Bewegung in dem rechten und eine niedersteigende Bewegung in dem linken Schachte hervor. Indem die warme Luft von aussen in den linken Schacht eintritt, wird sie auf ihrem Wege durch denselben abgekühlt, und die Bewegung setzt sich also in derselben Weise continuirlich fort. Im Winter ist die Luftsäule CE kälter als die DF; es folgt daraus ebenfalls eine Ungleichheit des Gewichtes der beiden Luftsäulen AC und BD; aber diese Ungleichheit findet jetzt im entgegengesetzten Sinne statt; sie ruft desshalb auch eine Bewegung in entgegengesetzter Richtung hervor, die so lange dauert, als die Temperatur ausserhalb des Stollens niedriger als im Innern desselben ist.

Um die Luft in den Bergwerken an den Orten, wo sich die Arbeiter befinden, immer wieder zu erneuern, ist es unerlässlich, Luftströme wie die, von denen wir eben gesprochen haben, hervorzubringen. Wenn daher die Bedingungen, unter denen ein natürlicher Luftwechsel, wie wir ihn eben beschrieben haben, möglich ist, nicht erfüllt sind, so muss man seine Zuflucht zu künstlichen Mitteln nehmen. Eines von diesen besteht darin, dass man in der Nachbarschaft des einen von den beiden vertikalen Schächten, die mit einander durch den Stollen in Verbindung stehen, ein kleines Feuer unterhält; die Gase, welche sich von diesem Feuer erheben, erfüllen den Schacht, und die dadurch hervorgebrachte Differenz in der Temperatur der beiden Luftsäulen, welche in den beiden Schächten enthalten sind, erzeugt den gewünschten Luftstrom. In den Kohlengruben ist es aber meist gefährlich, solche offene Feuer für den Luftwechsel

anzubringen, weil die Luft, welche aus der Grube kommt, und von der ein Theil durch das Feuer streichen muss, häufig grosse Mengen Kohlenwasserstoffgase enthält, durch deren Entzündung eine Explosion, die sich plötzlich durch den ganzen Stollen verbreiten würde, hervorgebracht werden könnte. In diesem Fall kann man die Mündung eines der Schächte mit einem Kamin überbauen und an der Basis desselben einen sog. Wetterofen A (Fig. 447) anbringen, sodass die aus der Grube kommenden Gase nur mit der äusseren Fläche desselben in Berührung kommen.

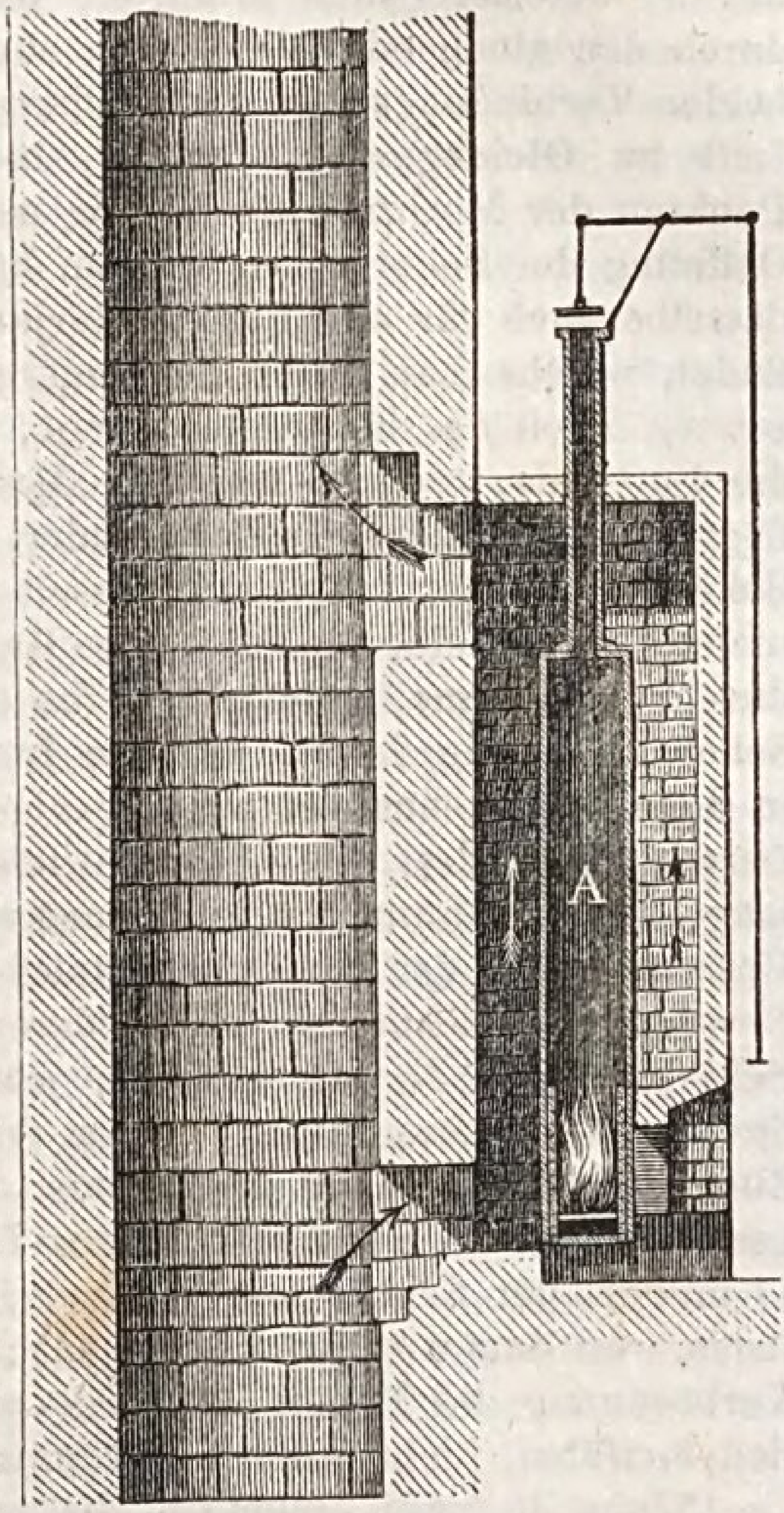


Fig. 447.

Es kommt oft vor, dass die unterirdischen Räume, in welchen ein Luftwechsel hergestellt werden soll, nur durch einen einzigen Schacht mit der Atmosphäre in Verbindung stehen. In diesem Fall theilt man entweder den Schacht mittelst einer vertikalen Scheidewand in zwei Abtheilungen, oder man bringt nach der ganzen Länge des Schachtes eine weite Röhre an, beides zu dem Zweck, um die Luft in der Tiefe durch zwei verschiedene Kanäle mit der freien Luft in Verbindung zu setzen. Bringt man es dann auf irgend eine Weise dahin, dass in den beiden Abtheilungen des Schachtes verschiedene Temperaturen bestehen, so ist der Vorgang offenbar ganz derselbe, als wenn zwei verschiedene Schächte vorhanden wären.

§. 318. **Zug in den Schornsteinen.** — Der Zug eines Schornsteins rührt von der Differenz her, welche zwischen der Dichtigkeit der Luft in seinem Innern und der in derselben Horizontalebene gelegenen äusseren Luft besteht. Denken wir

uns einen Schornstein, der mittelst eines Kamins oder eines Ofens, der von innen heizbar ist, in ein Zimmer mündet. Die Luft in diesem Zimmer steht einerseits durch die Spalten der Thüren und Fenster, andererseits durch den Kamin mit der freien Luft in Verbindung und kann nur dann im Gleichgewicht sein, wenn alle ihre Punkte, die in der nämlichen Horizontalebene liegen, einerlei Druck erfahren, sei es nun, dass dieser Druck durch den einen oder durch den andern der eben besprochenen beiden Verbindungswege fortgepflanzt werde. Wenn die äussere Luft im Gleichgewicht ist, so sind die Drückungen in allen Punkten der Horizontalebene, die man sich oberhalb der oberen Oeffnung des Schornsteins denken kann, einander gleich; damit dasselbe auch für alle Punkte derjenigen Horizontalebene stattfindet, welche man durch das Innere des Zimmers und den untersten Theil des Schornsteins legt, ist es nöthig, dass man für die Luftsäule, welche zwischen diesen beiden Horizontalebenen liegt, das nämliche Gewicht findet, ob man sie im Innern des Schornsteins oder ausserhalb desselben nimmt. Aber das kann nicht der Fall sein, sobald in dem Kamin oder Ofen Feuer brennt; durch die Wärme, welche dasselbe entwickelt, wird die Luft im Schornstein ausgedehnt, und die Luftsäule wiegt also, wenn sie in demselben genommen wird, weniger als die ausser demselben. Daraus folgt, dass das Gleichgewicht nicht stattfinden kann; so lange der erwähnte Temperaturunterschied und somit auch der Unterschied in der Dichtigkeit stattfindet, muss eine fortdauernde Bewegung bestehen, in Folge deren die Luft des Zimmers im Schornstein in die Höhe steigt, während von aussen durch die Spalten der Thüren und Fenster frische Luft zum Ersatz in's Zimmer dringt. Wenn das Zimmer von allen Seiten hermetisch geschlossen wäre, sodass die äussere Luft nicht eindringen könnte, so müsste der Schornstein nothwendig rauchen, weil der Luftstrom, von dem wir eben gesprochen haben, und der die lebhafte Verbrennung des Feuers unterhält und zugleich den Rauch mit sich fortführt, nicht entstehen könnte.

Wenn in zwei Zimmern, die mit einander in Verbindung stehen, zugleich Feuer gemacht wird, so kommt es häufig vor, dass in einem von beiden der Ofen oder Kamin raucht. Dies hat seinen Grund darin, dass die Spalten der Thüren und Fenster der Hindurchbewegung der Luft einige Schwierigkeit entgegensetzen, sodass sich die Luftmasse, welche in den beiden Zimmern enthalten ist, und welche ungehindert von dem einen in das andere übergehen kann, unter ähnlichen Umständen befindet wie

die eines Stollens in einem Bergwerke. Die beiden Schornsteine, durch welche diese Luftmasse mit der atmosphärischen Luft in Verbindung steht, spielen die Rolle der beiden Schächte, welche das Innere des Stollens mit der Oberfläche der Erde verbinden (Fig. 446); sobald die Luftsäulen in diesen beiden Schornsteinen nicht gleiches Gewicht haben, so erzeugt sich ein aufsteigender Luftstrom in dem einen und ein abwärtssteigender in dem anderen derselben. Um das Rauchen zu verhindern, darf man nur in beiden Zimmern ein grosses Feuer machen; dadurch wird in jedem derselben ein starker Zug hervorgebracht, der bewirkt, dass durch die kleinen Oeffnungen der Thüren und Fenster eine Luftmenge hereinströmt, die hinreichend ist, um die beiden Schornsteine zu speisen.

Man begreift nach dem Vorhergehenden, dass der Zug um so stärker wird, je höher der Schornstein ist. Es gibt jedoch eine gewisse Grenze, über welche hinaus eine grössere Höhe des Schornsteins keine Vermehrung des Zuges mehr hervorbringt. Denn wenn auch die Kraft, mit welcher sich die im Innern eines Schornsteins enthaltene Luftsäule erhebt, mit der Höhe des Schornsteins zunimmt, so wächst doch die Reibung, welche diese Luft in ihrer Bewegung erfährt, gleichfalls, und es kann sich offenbar wohl treffen, dass das, was man auf der einen Seite gewinnt, auf der anderen wieder verloren wird. Dies ist auch in der That der Fall. Es gewährt unter dem Gesichtspunkt des Zuges keinen Vortheil mehr, dem Schornsteine eine übermässige Höhe zu geben.

Wenn in einem Schornstein längere Zeit kein Feuer gemacht worden ist, und die äussere atmosphärische Luft wird, nachdem es einige Tage kalt war, wieder wärmer, so beobachtet man, dass in dem Schornstein ein absteigender Luftstrom hervorgebracht wird, der sich durch einen Geruch nach Russ bemerklich macht, welcher sich in dem Zimmer verbreitet. Dies kommt, wie man leicht sieht, daher, dass die Luft im Innern des Schornsteins noch kälter ist, als die ausser demselben in dem nämlichen Niveau gelegene. In Folge ihrer grösseren Dichtigkeit ist desshalb das Gewicht einer Luftsäule im Schornstein grösser als das einer äusseren von derselben Höhe, und dies gibt offenbar zu einem Luftstrom Veranlassung, der die entgegengesetzte Richtung von dem hat, welcher hervorgebracht wird, wenn man Feuer in dem Ofen oder Kamin macht. Die Luft geht durch die Spalten der Fenster und Thüren zum Zimmer hinaus und wird durch diejenige ersetzt, welche vom Schornstein herabkommt.

§. 319. **Das Archimedische Princip.** — Eine schwere, im Gleichgewicht befindliche Flüssigkeit übt auf alle Körper, mit denen sie in Berührung ist, Drückungen aus, die von dem Gewichte derselben herrühren. Wenn man also einen festen Körper A (Fig. 448) in einer Flüssigkeit untertaucht, so wird er auf allen Theilen seiner Oberfläche von dieser Flüssigkeit gedrückt; alle diese Drückungen können in eine Resultante vereinigt werden, die wir durch folgende Betrachtung ihrer Grösse, Richtung und Lage nach leicht auffinden können.

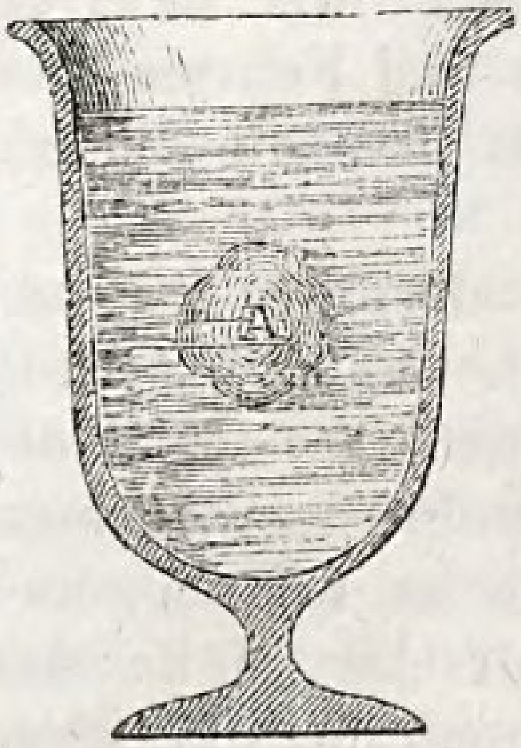


Fig. 448.

Setzen wir zuerst voraus, man habe blos eine im Gleichgewicht befindliche Flüssigkeitsmasse, also keinen Körper, der in sie getaucht ist. Aus derselben können wir uns offenbar ein Stück herausdenken, das genau die Form des Körpers A hat. Dieses Stück bleibt inmitten der Flüssigkeit in Ruhe, obgleich es schwer ist; es fällt nicht herab, offenbar weil es durch die umgebende Flüssigkeit gehalten wird. Denken wir uns nun, dass dieses Stück erstarre, ohne seine Dichtigkeit zu ändern, d. h. dass seine Moleküle einfach ihre Eigenschaft der leichten Verschiebbarkeit gegen einander einbüssen, ohne jedoch ihre gegenseitige Stellung selbst dabei zu verändern, so ist klar, dass dadurch das Gleichgewicht nicht gestört wird. Wir haben somit einen festen Körper, der genau die Gestalt des Körpers A hat, und welcher inmitten der Flüssigkeit, welche ihn umgibt, durch die Drückungen, welche diese Flüssigkeit auf die verschiedenen Punkte seiner Oberfläche ausübt, schwebend erhalten wird. Diese verschiedenen Drückungen halten folglich dem Gewichte des festen Körpers, von dem wir sprechen, das Gleichgewicht; sie müssen also eine Resultante haben, welche diesem Gewichte gleich und gerade entgegengesetzt ist, d. h. diese Resultante muss, vertikal aufwärts gerichtet, durch den Schwerpunkt des Körpers gehen und gleich dem Gewichte des Körpers sein. Denken wir uns nun, dass das Flüssigkeitsstück, von dem bisher die Rede war, verschwinde und der Körper A an seine Stelle gesetzt werde, ohne dass dadurch in den übrigen Verhältnissen eine Aenderung eintritt, so ist klar, dass die Drückungen, welche die Flüssigkeit auf die ganze Oberfläche dieses Körpers A ausübt, die nämlichen sind wie diejenigen, welche vorhin das erstarrte Flüssigkeitsstück zu erleiden hatte, dessen Platz der Körper A einnimmt. Daraus folgt: Die Drück-

ungen, welche von einer Flüssigkeit auf die Oberfläche eines festen Körpers A, der in sie eingetaucht ist, ausgeübt werden, haben eine Resultante, die vertikal von oben nach unten gerichtet, gleich dem Gewichte der von dem Körper verdrängten Flüssigkeit ist und durch den Schwerpunkt dieser verdrängten Flüssigkeitsmasse hindurchgeht. Dieses überaus wichtige Gesetz wurde schon von *Archimedes* entdeckt und trägt desshalb seinen Namen.

Die Resultante der Drückungen, welche ein Körper, der in einer schweren, im Gleichgewicht befindlichen Flüssigkeit eingetaucht ist, zu erleiden hat, sucht den Körper in der Flüssigkeit steigen zu machen, in die Höhe zu treiben; sie heisst desshalb auch gewöhnlich Auftrieb der Flüssigkeit; in Folge seines Gewichtes dagegen sucht der Körper zu fallen. Unter der gleichzeitigen Wirkung beider Kräfte wird folglich der Körper, welcher in einer Flüssigkeit untergetaucht ist, in dieser Flüssigkeit steigen oder fallen, je nachdem die erste dieser Kräfte grösser ist als die zweite, oder umgekehrt. In dem Falle, wo der Auftrieb des Körpers grösser ist, als sein Gewicht, steigt der Körper in die Höhe, um eine Gleichgewichtslage einzunehmen, die wir später (§. 322) kennen lernen werden; wenn dagegen das Gewicht des Körpers den Auftrieb, d. h. das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit übertrifft, so sinkt der Körper in der Flüssigkeit unter und zwar so lange, bis er auf ein Hinderniss stösst, das ihn am weiteren Fallen hindert; aber es ist klar, dass diese fallende Bewegung des Körpers nur durch den Ueberschuss seines Gewichtes über den Auftrieb hervorgebracht wird; der Körper verhält sich ganz so, als wenn dieser Ueberschuss allein auf ihn wirken würde. Dies ist darunter zu verstehen, wenn man sagt, dass ein Körper, welcher in eine Flüssigkeit eingetaucht ist, so viel an seinem Gewichte verliert, als das Gewicht der verdrängten Flüssigkeitsmasse beträgt. — Wenn endlich das Gewicht des Körpers gerade gleich dem der verdrängten Flüssigkeit ist, so ist er in jeder Lage in der Flüssigkeit im Gleichgewicht, er schwebt in derselben.

§. **320.** Das Archimedische Princip kann auf folgende Weise mittelst der hydrostatischen Waage durch den Versuch erwiesen werden.

Die hydrostatische Waage, deren Namen von dem Gebrauche herrührt, zu welchem sie bestimmt ist, zeichnet sich vor anderen gewöhnlichen Waagen nur durch eine Vorrichtung aus, welche

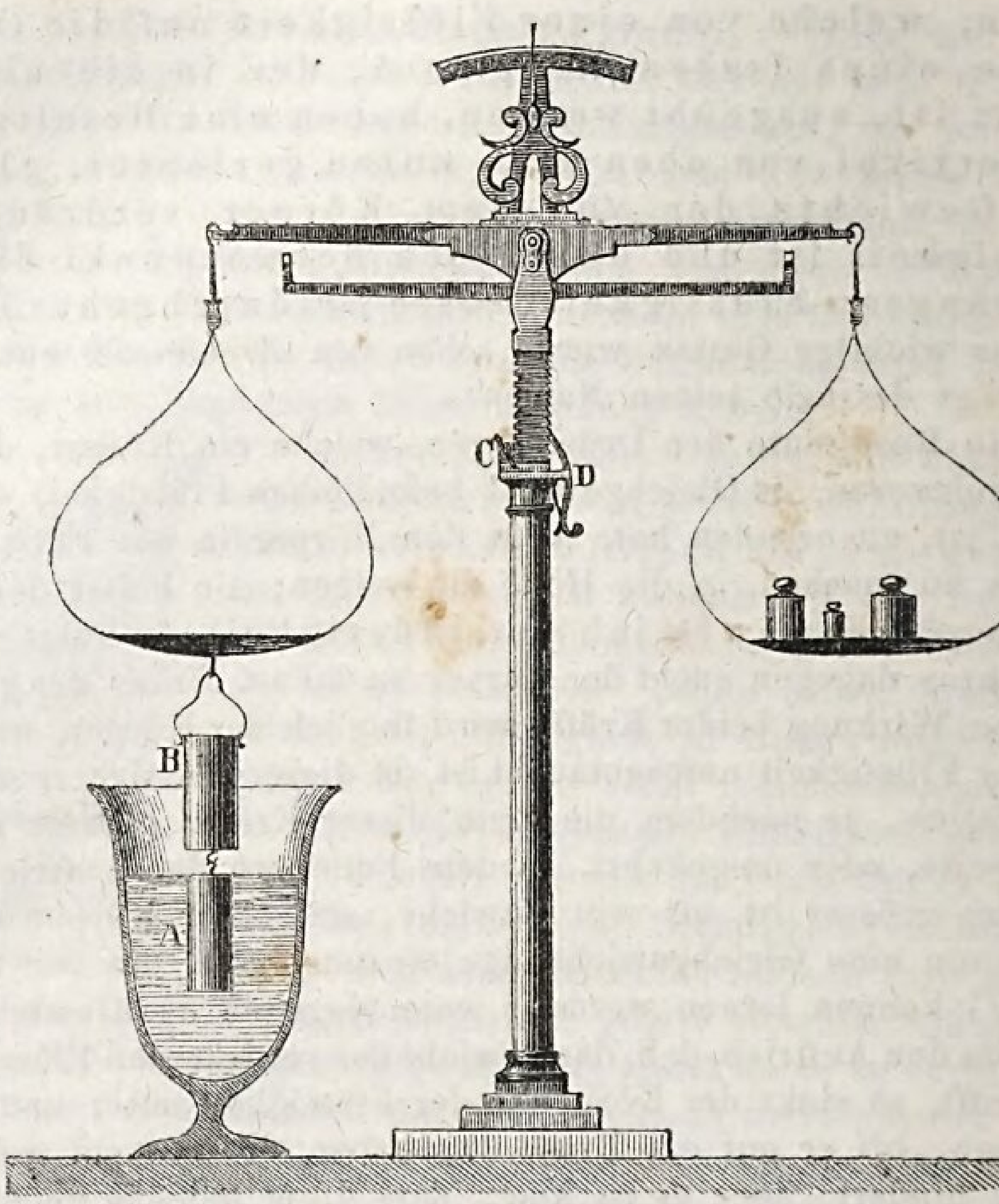


Fig. 449.

gestattet, den Waagbalken mit den beiden Waagschalen nebst der Unterlage, auf welcher er ruht, nach Belieben heben oder senken zu können. Zu diesem Zweck wird der Waagbalken durch einen Stab getragen, welcher sich zum Theil im Innern einer hohlen Säule befindet, die auf dem Fusse der Waage befestigt ist (Fig. 449). Dieser Stab ist auf der einen Seite mit Zähnen, ähnlich denen einer Zahnstange, versehen und kann mittelst eines Triebes C auf und nieder bewegt werden; auf der entgegengesetzten Seite trägt der Stab ebenfalls Zähne, die aber die Gestalt von Sägezähnen haben, und in welche ein Sperrhaken D eingreift, der um eine durch seine Mitte gehende Achse beweglich ist; eine kleine Feder sucht, indem sie auf das untere Ende dieses Sperrhakens wirkt, fortwährend das obere Ende desselben in Eingriff mit den Zähnen zu erhalten. Auf diese Art kann man den Stab, welcher den Waagbalken trägt, durch Drehung

des Triebes C heben, ohne dass sich der Sperrhaken D dem entgegensetzt; dieser verhindert nur den Waagbalken, wieder zurückzufallen, wenn man nicht mehr an dem Triebe C wirkt. Wenn man den Waagbalken wieder herablassen will, so drückt man an das untere Ende des Sperrhakens D. Dadurch wird die kleine Feder daselbst zurückgebogen, und das obere Ende der Sperrklinke entfernt sich von den Zähnen des Stabes, welcher dadurch ungehindert herabgehen kann. *)

Sehen wir nun, wie man sich der hydrostatischen Waage bedient, um das Archimedische Princip zu beweisen. Man nimmt einen hohlen Metallcylinder B und einen massiven A, der genau in den hohlen Raum des ersteren hineinpasst. Diese beiden Cylinder hängt man, den massiven unter den hohlen, wie es die Figur zeigt, beide an einem Haken unter der einen Waagschale der Waage auf und bringt dieselbe durch Gewichte, welche man in die andere Schale legt, in's Gleichgewicht. Nachdem dies geschehen ist, erhebt man den Waagbalken mit den beiden Schalen, wodurch natürlich das Gleichgewicht nicht im mindesten gestört wird, und stellt ein mit Wasser gefülltes Gefäss unter die beiden Cylinder A und B; hierauf senkt man den Waagbalken wieder so weit, bis der Cylinder A völlig in der Flüssigkeit untergetaucht ist. Sobald dieser Cylinder etwas in das Wasser eintaucht, wird das Gleichgewicht gestört; die Waagschale, welche die beiden Cylinder A und B trägt, wirkt nicht mehr stark genug auf den Waagbalken, um dem Gewichte der anderen Waagschale mit ihrem Inhalt das Gleichgewicht zu halten. Dies zeigt, dass der Cylinder A von der Flüssigkeit, in welche er taucht, so zu sagen gehoben wird, sodass er sich unter denselben Umständen befindet, als wenn er einen Theil seines Gewichtes verloren hätte. Um das Gleichgewicht wieder herzustellen, darf man nur in den hohlen Cylinder B Wasser giessen; der Versuch zeigt, dass man in dem Fall, wo der Körper A ganz in das Wasser des untergestellten Gefässes eintaucht, den Cylinder B bis oben an mit Wasser füllen muss, um das Gleichgewicht an der Waage wieder herzustellen. Es ist somit erwiesen, dass der Körper A,

*) Es ist nicht gerade nöthig, dass eine Waage die Einrichtung, wie sie hier beschrieben wurde, besitzt, um als hydrostatische Waage benützt werden zu können; jede gute Waage, wie z. B. die in Fig. 101, S. 126 abgebildete, kann zu demselben Zweck dienen, wenn nur die eine ihrer Schalen durch eine andere, gleich schwere, aber kürzere ersetzt werden kann, die unten mit einem Häkchen versehen ist und so gestattet, einen Körper unter ihr aufzuhängen und in ein darunter gestelltes Gefäss mit Wasser oder einer anderen Flüssigkeit eintauchen zu lassen.

indem er unter Wasser getaucht wird, soviel an seinem Gewichte verliert, als das Gewicht eines gleich grossen Volumens Wasser, dessen Stelle er einnimmt, beträgt.

§. 321. Wenn ein fester Körper, der in eine Flüssigkeit eingetaucht ist, in dieser freigelassen wird, so ist er der Wirkung zweier Kräfte unterworfen, die im entgegengesetzten Sinne auf ihn wirken. Die eine dieser Kräfte, sein Gewicht, sucht ihn abwärts zu ziehen; die andere, die Resultante der Drückungen, welche die Flüssigkeit auf seine Oberfläche ausübt, oder der Auftrieb dieser Flüssigkeit, sucht ihn dagegen in die Höhe steigen zu machen. Die erste hat ihren Angriffspunkt im Schwerpunkte G (Fig. 450) des Körpers; der Angriffspunkt der zweiten muss im Schwerpunkt G′ der verdrängten Flüssigkeit angenommen werden, da, wie man leicht sieht, ein fester Körper, den man sich durch Erstarrung eines gewissen Flüssigkeitsstücks entstanden denkt, in jeder Lage in der Flüssigkeit im Gleichgewicht gehalten wird. Wenn der eingetauchte Körper homogen, d. h. wenn seine Masse gleichmässig über sein ganzes Volumen vertheilt ist, so fällt sein Schwerpunkt G mit dem Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeit zusammen; dies ist im Allgemeinen nicht mehr der Fall, wenn der Körper nicht homogen ist.

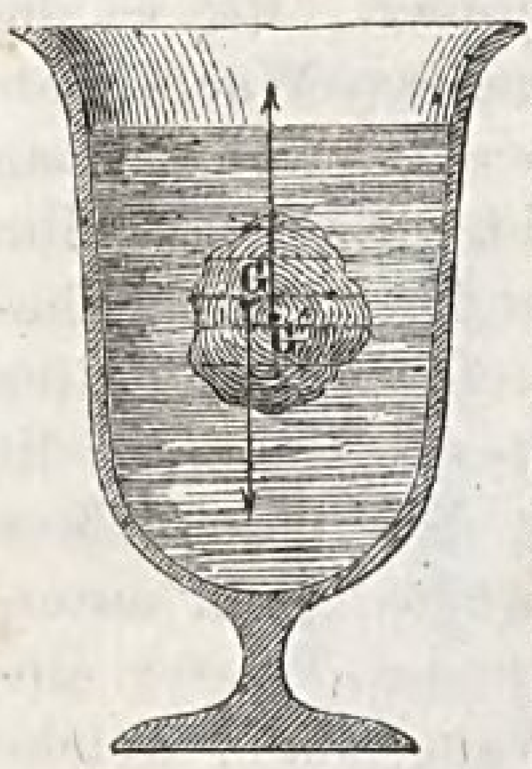


Fig. 450.

Damit ein fester Körper, der in einer Flüssigkeit untergetaucht ist, in derselben im Gleichgewicht bleibt, ist es nothwendig: 1) dass sein Gewicht gleich dem der verdrängten Flüssigkeit ist; 2) dass der Schwerpunkt des Körpers und der Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeit zusammenfallen, oder dass sie wenigstens auf der nämlichen Vertikallinie gelegen sind. Man sieht in der That, dass in dem Falle, wo diese Bedingungen erfüllt sind, der Körper zweien gleichen und entgegengesetzten Kräften unterworfen ist, die nach der nämlichen geraden Linie auf ihn wirken und sich also gegenseitig aufheben; während in dem Falle, wo jene Bedingungen nicht beide zugleich befriedigt sind, die Kräfte, welche auf den Körper wirken, demselben eine Bewegung ertheilen müssen. Wenn der Schwerpunkt eines Körpers, welcher in einer Flüssigkeit, in der er untergetaucht ist, im Gleichgewicht bleibt, nicht mit dem Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeit zusammenfällt, so wird, wie man leicht sieht, sein Gleichgewicht stabil oder labil sein, je nachdem der erste jener beiden Punkte unter oder über dem zweiten gelegen ist.

Ein Fisch, welcher ruhig in dem Wasser, in welchem er sich befindet, stehen bleibt, erfüllt die beiden Bedingungen, von welchen wir eben gesprochen haben. Wenn er hierauf durch irgend ein Mittel sein Volumen vergrössert, ohne zugleich sein Gewicht zu vermehren, so wird das Gleichgewicht gestört; der Auftrieb des Wassers wird grösser und der Fisch muss folglich in die Höhe steigen. Das Gegentheil findet natürlich statt, wenn er sein Volumen vermindert; denn mit seinem Volumen mindert sich zugleich auch der Auftrieb, und der Ueberschuss des Gewichts über den Auftrieb zieht das Thier abwärts. Diese Vermehrung und Verminderung ihres Volumens bringen gewisse Fische durch ein besonderes Organ, die sog. Schwimmblase, hervor. Diese besteht aus einer allseitig geschlossenen Hülle, welche Gas enthält. Das Volumen dieses Gases kann durch einen grösseren oder geringeren Druck, welcher von dem Fische auf die Blase ausgeübt wird, entsprechend vermindert werden, sodass sich das Thier durch diesen Druck allein, welchen es nach Belieben abändert, in dem Wasser, in dem es sich befindet, erheben und wieder senken kann.

Wenn man eine Weinbeere in ein Glas mit Champagner bringt, so sinkt sie alsbald zu Boden. Aber die Kohlensäure, welche sich fortwährend aus der Flüssigkeit entwickelt, setzt sich bald in Form von kleinen Bläschen ringsum auf die Oberfläche der Beere. Diese Gasblasen vergrössern das Volumen der Beere, ohne dass sie ihr Gewicht erheblich vermehren. Der Auftrieb der Flüssigkeit, welcher vorher kleiner war als das Gewicht der Beere, wird nun grösser als dieses und die Weinbeere steigt bis zur Oberfläche der Flüssigkeit. Wenn man hierauf dieser Beere einen kleinen Anstoss ertheilt, um die Bläschen von Kohlensäure, welche an ihrer Oberfläche haften, davon zu trennen, so sieht man sie wieder auf den Boden des Glases zurücksinken; nach einiger Zeit erhebt sie sich von Neuem, und so kann der Versuch fortgesetzt werden, so lange die Entbindung der Kohlensäure aus dem Weine dauert.

§. 322. **Schwimmende Körper.** — Wir haben im Vorhergehenden gesehen, dass ein Körper, der in eine Flüssigkeit eingetaucht ist, in derselben emporsteigt, wenn sein Gewicht kleiner als das der verdrängten Flüssigkeit ist. Dies ist z. B. der Fall bei einem Stück Kork, das in Wasser getaucht wird. Der Körper steigt in der Flüssigkeit so lange, bis er an die Oberfläche derselben gelangt ist, und nimmt hier eine neue Gleichgewichtslage an, in welcher er theilweise noch in der Flüssigkeit eintaucht,

während sein übriger Theil über die Oberfläche derselben emporragt; der Körper schwimmt auf der Flüssigkeit. Wir wollen nun die Bedingungen, unter welchen diese Gleichgewichtslage stattfindet, etwas näher entwickeln.

Wir können hiezu eine ganz ähnliche Betrachtungsweise anwenden, wie diejenige war, die uns zur Kenntniss des Archimedischen Princips führte. Da der Körper nur theilweise in die Flüssigkeit eintaucht, so erfährt er natürlich keinen so grossen Auftrieb, als wenn er ganz in derselben untergetaucht wäre. Wenn man sich den Körper entfernt und die Höhlung, welche dadurch in der Flüssigkeitsmasse entsteht, mit Flüssigkeit derselben Art ausgefüllt denkt, so wird diese Flüssigkeit, welche an die Stelle des eingetauchten Theils des Körpers gesetzt wurde, durch die Drückungen, welche die umgebende Flüssigkeit auf ihre Oberfläche ausübt, im Gleichgewicht gehalten; da diese Drückungen aber dieselben sind wie diejenigen, welche der Körper zu erleiden hat, so folgt daraus, dass der Auftrieb, welchen ein Körper von einer Flüssigkeit, in welche er nur theilweise eingetaucht ist, erfährt, gleich dem Gewichte der durch den eingetauchten Theil des Körpers verdrängten Flüssigkeit ist; der Angriffspunkt der Kraft, durch welche dieser Auftrieb dargestellt wird, muss offenbar im Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeit angenommen werden.

Wenn der Auftrieb einer Flüssigkeit auf einen Körper, der ganz in sie eingetaucht wurde, grösser als das Gewicht des Körpers ist, so steigt derselbe in die Höhe, bis er die freie Oberfläche der Flüssigkeit erreicht. Wenn er nun fortfährt zu steigen, so vermindert sich derjenige Theil des Körpers, der in die Flüssigkeit eintaucht, mehr und mehr, und in demselben Maasse nimmt auch der Auftrieb der Flüssigkeit auf den Körper ab. Man begreift daraus, dass ein Moment kommen muss, wo dieser Auftrieb, der vorher grösser als das Gewicht des Körpers war, demselben gleich wird. Wenn daher der Körper in Folge seiner gewonnenen Geschwindigkeit fortfährt zu steigen, so nimmt die Kraft, welche ihn von unten nach oben treibt, noch mehr ab; sein Gewicht überwiegt folglich diese Kraft und zerstört die aufsteigende Bewegung, welche er besitzt, nach kurzer Zeit; der Körper sinkt wieder herab und nimmt so nach einigen Schwingungen eine Gleichgewichtslage an, in welcher er, wie man sagt, auf der Oberfläche der Flüssigkeit schwimmt. Damit dieses Gleichgewicht bestehen kann, ist offenbar erforderlich: 1) dass das Gesammtgewicht des Körpers gleich sei dem Gewichte der

Flüssigkeit, welche sein eingetauchter Theil verdrängt; 2) dass der Schwerpunkt G' (Fig. 451) des Körpers und der Schwerpunkt G der verdrängten Flüssigkeit in derselben Vertikalen gelegen sind.

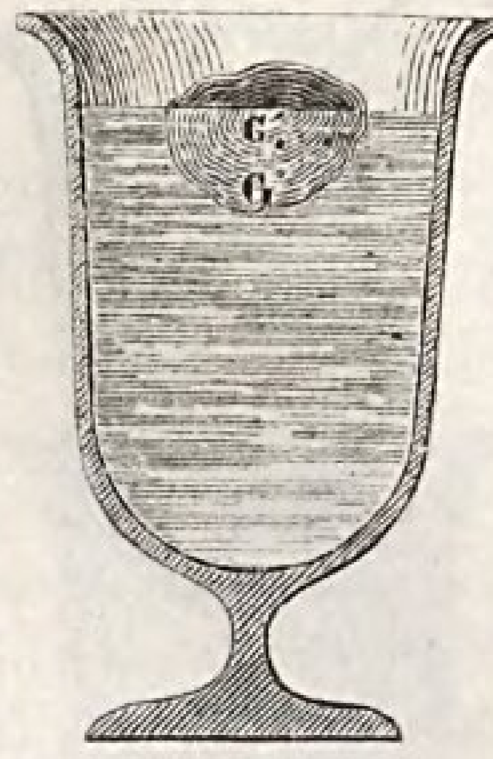


Fig. 451.

Damit folglich ein Körper auf einer Flüssigkeit schwimmen kann, muss sein Gewicht kleiner als das eines gleich grossen Volumens der Flüssigkeit sein; d. h. er muss ein geringeres specifisches Gewicht als die Flüssigkeit haben. Auf Wasser schwimmen also nur solche Körper, deren specifisches Gewicht kleiner als Eins ist. Ebenso ist klar, dass ein schwimmender Körper um so weniger Flüssigkeit verdrängt und also um so höher über die freie Oberfläche der Flüssigkeit hervorragt, je geringer, bei gleichem Volumen, sein Gewicht ist, d. h. ein je kleineres specifisches Gewicht er hat.

§. **323.** Die beiden Bedingungen, welche wir oben angegeben haben, sind nothwendig, aber auch hinreichend, dass ein schwimmender Körper im Gleichgewicht ist; dieses Gleichgewicht kann aber noch, je nach den Umständen, stabil oder labil sein. Als wir oben das Gleichgewicht eines Körpers betrachteten, der in einer Flüssigkeit ganz untergetaucht wird (§. 321), haben wir gesagt, dass dieses Gleichgewicht stabil oder labil sei, je nachdem der Schwerpunkt des Körpers unter oder über dem der verdrängten Flüssigkeit liege; im gegenwärtigen Falle ist dies nicht mehr ganz so: das Gleichgewicht eines schwimmenden Körpers ist allemal stabil, wenn der Schwerpunkt des Körpers unter dem der verdrängten Flüssigkeit liegt; aber diese Bedingung ist zur Stabilität des Gleichgewichts nicht mehr nothwendig erforderlich; diese kann möglicherweise auch noch stattfinden, wenn der Schwerpunkt des Körpers über dem der verdrängten Flüssigkeit gelegen ist. Von der Richtigkeit dieser Behauptungen können wir uns auf das Leichteste überzeugen.

Nehmen wir zunächst den Fall, wo ein Cylinder von kleinem Durchmesser aus zwei Theilen von sehr verschiedener Dichtigkeit gebildet wird, die an ihren Enden mit einander vereinigt sind (Fig. 452). Derselbe sei so eingerichtet, dass er in einer Flüssigkeit in vertikaler Stellung schwimmt, und dass dabei sein Schwerpunkt unter dem der verdrängten Flüssigkeit liegt. Wenn man diesen Cylinder zur Seite neigt, wie es die Figur anzeigt, so wird er sich unter der Wirkung der beiden Kräfte, welche

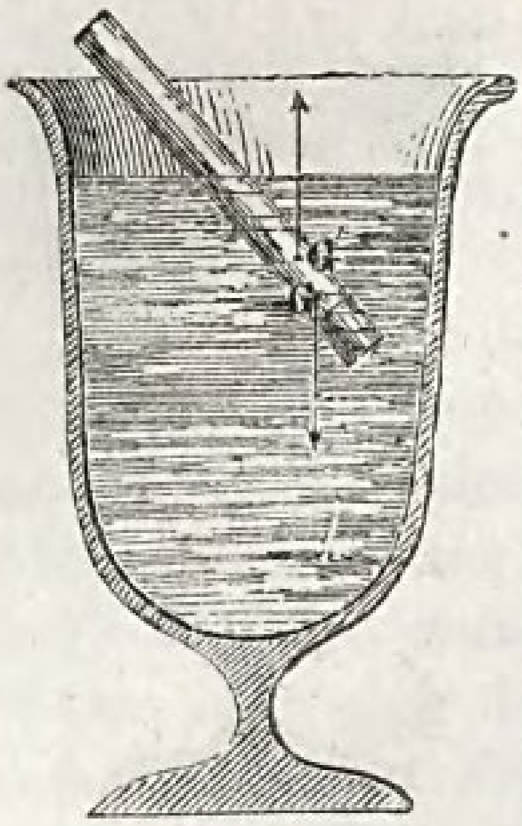


Fig. 452.

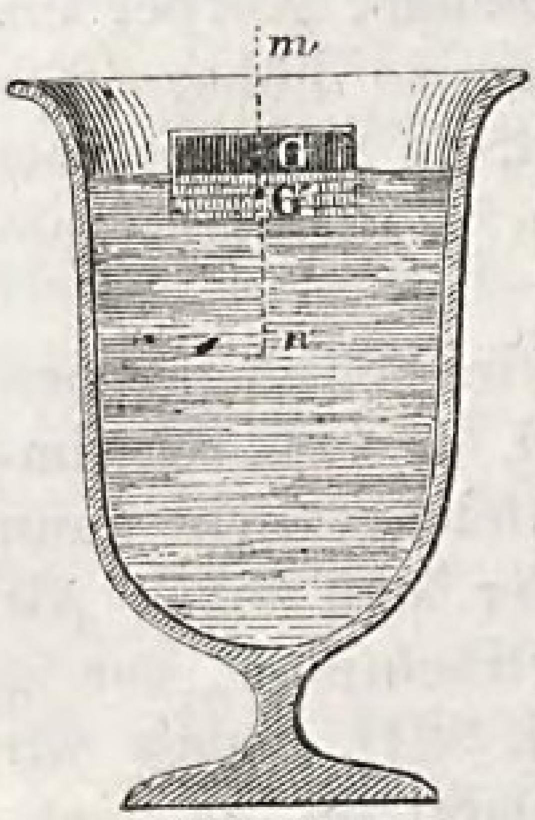


Fig. 453.

auf ihn wirken, und von denen die eine, sein Gewicht, in seinem Schwerpunkt G vertikal von oben nach unten, die andere dagegen, der Auftrieb der Flüssigkeit, im Schwerpunkt G' der verdrängten Flüssigkeitsmasse vertikal von unten nach oben angreift, alsbald wieder erheben. Sein Gleichgewicht ist also ein stabiles, und es gilt dies offenbar für jeden Körper, wie auch dessen Gestalt ist, wenn nur sein Schwerpunkt unter dem der verdrängten Flüssigkeit liegt.

Untersuchen wir jetzt den Fall, wo der schwimmende Körper homogen ist, wo also, wie eine leichte Ueberlegung zeigt, sein Schwerpunkt allemal über dem der verdrängten Flüssigkeit liegen muss. Wir wollen dabei die Gestalt des Körpers, eines Stücks Korks z. B., das auf Wasser schwimmt, als eine sehr einfache, als die eines niedrigen rechtwinkeligen Parallelepipedums (Fig. 453) voraussetzen. Dieses Stück Kork stellt sich natürlich so, dass seine beiden grössten Seitenflächen horizontal sind; der eingetauchte Theil desselben wird folglich ebenfalls die Form eines rechtwinkeligen Parallelepipedums haben. Die Schwerpunkte G und G' des Körpers und der verdrängten Flüssigkeit liegen in den Mittelpunkten der entsprechenden Parallelepipeda: der erste G nothwendig über dem zweiten G'. Nichtsdestoweniger kehrt das Stück Kork, wenn es etwas seitwärts gleichviel auf welche Seite, geneigt wird, wieder in seine ursprüngliche Lage zurück; das Gleichgewicht in dieser Lage ist also stabil. Der Grund davon ist folgender: Der Schwerpunkt G des Korkstücks behält seine Lage im Innern dieses Körpers bei, wie auch die Stellung desselben verändert werden möge. Wenn dasselbe bei dem Schwerpunkt G' der verdrängten Flüssigkeit der Fall wäre, d. h. wenn derselbe stets mit einem und demselben Punkt des Korkstücks zusammenfallen würde, so würde bei einer Neigung dieses Körpers auf irgend eine Seite die Linie GG' gleichfalls eine schiefe Lage erhalten; und da die Kraft in G von oben nach unten und die in G' von unten nach oben wirkt, so würden diese Kräfte das Korkstück umwerfen, um es in eine andere Gleichgewichtslage zu führen. Aber dem

ist nicht so: sobald das Korkstück aus seiner Gleichgewichtslage gebracht wird, ändert die Flüssigkeit, welche es verdrängt, ihre Gestalt; der Schwerpunkt dieser Flüssigkeit nimmt also eine andere Lage innerhalb des Körpers ein als vorher. Wenn der schwimmende Körper nach links geneigt wird (Fig. 454), so wird der Punkt G′ nicht allemal auf die rechte Seite der durch den Punkt G gezogenen Vertikalen versetzt, wie es sein müsste, wenn er eine unveränderliche Lage im Innern des festen Körpers einnehmen und daher dem Körper in seiner Bewegung folgen würde; der Punkt G′ kann vielmehr auch in vielen Fällen auf die linke Seite dieser Vertikalen zu liegen kommen (s. d. Figur), und wenn dies der Fall ist, so suchen offenbar die Kräfte, welche an den Punkten G und G′ wirken, den schwimmenden Körper in die Gleichgewichtslage wieder zurückzuführen, aus welcher er gebracht worden ist.

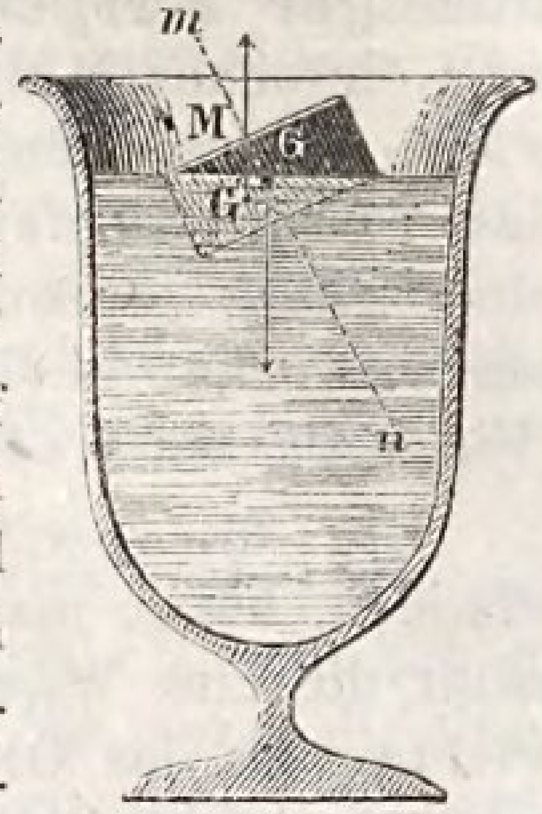


Fig. 454.

Es kommt also darauf an, ob der Schwerpunkt G′ der verdrängten Flüssigkeit, wenn der schwimmende Körper ein wenig auf die Seite, etwa auf die linke, geneigt wird, links oder rechts von der Vertikalen, welche durch den Schwerpunkt G des Körpers hindurchgeht, zu liegen kommt. Im ersteren Fall ist die Gleichgewichtslage des Körpers eine stabile, im zweiten dagegen labil. Wenn der schwimmende Körper eine Mittellinie *mn* (Fig. 453 und 454) hat, die in der Gleichgewichtslage vertikal gerichtet ist, so liegen in dieser Lage die Schwerpunkte G und G′ auf jener Mittellinie. Bei einer Neigung des Körpers nach irgend einer Seite, z. B. nach links, wird, wie leicht einzusehen ist, der Schwerpunkt G′ der verdrängten Flüssigkeit stets auf die linke Seite der Mittellinie *mn* geführt, die von ihm aus vertikal aufwärts gezogene Linie wird daher diese Mittellinie, die zugleich mit dem Körper geneigt wurde, stets in einem Punkte M (Fig. 454) treffen. Dieser Punkt, den man, unter der Voraussetzung einer nur sehr geringen Neigung des Körpers, Metacentrum genannt hat, liegt offenbar über oder unter dem Schwerpunkte G des Körpers, je nachdem der Punkt G′ links oder rechts von der durch diesen Punkt G gezogenen Vertikalen liegt. Hält man dies mit dem Vorigen zusammen, so kann man leicht folgenden Satz aussprechen: Die Gleichgewichtslage eines schwimmenden Körpers ist stabil oder labil, je nachdem,

bei einer geringen Neigung desselben, das Metacentrum über oder unter den Schwerpunkt des Körpers zu liegen kommt.

§. 324. **Anwendung des Archimedischen Princips zur Bestimmung des specifischen Gewichtes fester und flüssiger Körper.** — Das Archimedische Princip liefert ein sehr einfaches Mittel, die Dichtigkeit oder das specifische Gewicht eines festen oder flüssigen Körpers zu bestimmen, d. h. das Verhältniss des Gewichts eines Körpers zu dem Gewichte eines gleich grossen Volumens Wasser zu finden (§. 5). Zu diesem Zwecke bedient man sich der hydrostatischen Waage (Fig. 449, Seite 640).

Um das specifische Gewicht eines festen Körpers zu bestimmen, hängt man denselben mittelst eines sehr feinen Fadens unter die eine Waagschale und legt auf die andere so viele Gewichte, bis das Gleichgewicht hergestellt ist. Auf diese Weise erhält man das Gewicht des Körpers ganz so, als wenn man ihn, anstatt ihn an den Haken unter die Schale zu hängen, auf die Schale gelegt hätte. Indem man hierauf so verfährt, wie es in §. 320 beschrieben worden ist, lässt man den Körper in ein unter die Waagschale gesetztes Gefäss mit Wasser tauchen. Man wird sofort sehen, dass das Gleichgewicht gestört wird, und um es wieder herzustellen muss man einen Theil der Gewichte, welche dem Körper das Gleichgewicht hielten, wegnehmen. Die übrig bleibenden geben das Gewicht des Körpers, wenn er in Wasser taucht, d. h. das Gewicht dieses Körpers, vermindert um das Gewicht eines gleich grossen Volumens Wasser. Wenn man folglich das Gewicht des Körpers durch den Gewichtsverlust, welchen er erfährt, wenn er in Wasser eingetaucht wird, dividirt, so erhält man das specifische Gewicht oder die Dichtigkeit des Körpers. Wenn z. B. der Körper, dessen specifisches Gewicht bestimmt werden soll, ausserhalb des Wassers $25^{gr},72$ wiegt, in Wasser getaucht aber nur $18^{gr},37$, so beträgt sein Gewichtsverlust im Wasser $7^{gr},35$, und das specifische Gewicht dieses Körpers ist folglich $\frac{25,72}{7,35}$ oder nahezu gleich 3,5.

Das oben beschriebene Verfahren setzt voraus, dass der Körper, dessen specifisches Gewicht bestimmt werden soll, im Wasser untersinkt und dass er sich in demselben nicht auflöst. Wenn der Körper leichter als ein gleich grosses Volumen Wasser ist und daher auf dem Wasser schwimmen würde, so muss man ihn

mit einem anderen, schwereren Körper verbinden, der ihn unter die Oberfläche der Flüssigkeit hinabzieht. Natürlich muss der Gewichtsverlust dieses Hilfskörpers im Wasser besonders bestimmt und von dem gesammten Verlust der beiden Körper abgezogen werden, um den des gegebenen Körpers allein zu erhalten. Wenn aber der feste Körper im Wasser auflöslich ist und daher nicht in dasselbe getaucht werden darf, so bestimmt man seinen Gewichtsverlust in einer anderen Flüssigkeit, in der er sich nicht auflöst und deren specifisches Gewicht man kennt. Dieser Gewichtsverlust verhält sich dann zu dem, welchen der Körper im Wasser erleiden würde, wie das specifische Gewicht der Flüssigkeit zu Eins, woraus der Gewichtsverlust des Körpers im Wasser berechnet werden kann.

Um das specifische Gewicht einer Flüssigkeit zu bestimmen, nimmt man irgend einen festen, in dieser Flüssigkeit unlöslichen Körper, am besten ein Stück Glas, und hängt ihn unter die eine Schale der hydrostatischen Waage; nachdem man diesen Körper gewogen hat, bestimmt man die Gewichtsverluste, welche er erfährt, wenn er einmal in Wasser und dann in die Flüssigkeit taucht, deren Dichtigkeit bestimmt werden soll. Diese Gewichtsverluste sind bezüglich die Gewichte einer Menge Wasser und einer Menge der betrachteten Flüssigkeit, die alle beide dasselbe Volumen wie der angewandte feste Körper haben. Wenn man folglich den zweiten Gewichtsverlust durch den ersten dividirt, so erhält man das Verhältniss des Gewichts eines gewissen Volumens der vorgelegten Flüssigkeit zum Gewichte eines gleich grossen Volumens Wasser, d. h. die Dichtigkeit oder das specifische Gewicht dieser Flüssigkeit.

Das Gewicht eines Volumens Wasser, das gleich dem Volumen des Körpers ist, dessen specifisches Gewicht bestimmt werden soll, ändert sich mit der Temperatur des Wassers. Es kann desshalb die Dichtigkeit des Körpers nur dann bestimmt angegeben werden, wenn man das Wasser, dessen man sich zur Vergleichung bedient, als von bestimmter Temperatur voraussetzt; als diese Temperatur nimmt man gewöhnlich die, bei welcher das Wasser seine grösste Dichtigkeit hat, nämlich $4^0,1$ C. Ausserdem ist nicht zu vergessen, dass auch die Dichtigkeit des Körpers selbst mit der Temperatur sich ändert, und dass man also streng genommen nur von der Dichtigkeit eines Körpers bei einer gewissen Temperatur reden kann. Wenn man folglich die Dichtigkeit eines festen oder flüssigen Körpers auf die oben angegebene Weise gefunden hat, so muss das erhaltene Resultat noch

corrigirt werden, wenn die Temperatur des angewandten Wassers nicht die war, welche man in der Begriffsbestimmung des specifischen Gewichts angenommen hat; das so corrigirte Resultat selbst gilt aber natürlich dann nur für die Temperatur, welche der Körper während der Bestimmung seiner Dichtigkeit besass. Wir wollen hier nicht näher auf die Art und Weise eingehen, wie diese Correction angebracht wird, und verweisen in dieser Beziehung auf die physikalischen Werke. Nur das wollen wir noch beifügen, dass in einer grossen Zahl von Fällen diese Correctionen nicht nothwendig sind, und dass man sich selbst in vielen praktischen Anwendungen statt chemisch reinen destillirten Wassers gewöhnlichen Wassers bedienen kann. Der Fehler, welcher dadurch begangen wird, ist immer sehr klein, und der Grad der Annäherung, mit welcher die Dichtigkeit des Körpers erhalten wird, gewöhnlich hinreichend. Dies ist z. B. der Fall, wenn man die Dichtigkeit eines Körpers sucht, um sich derselben zur annähernden Berechnung des Gewichts eines grossen Volumens des Körpers zu bedienen.

§. 325. **Aräometer.** — Das specifische Gewicht der Körper kann, ausser mit der hydrostatischen Waage, auch noch mittelst besonderer Instrumente bestimmt werden, die man mit dem Namen Aräometer bezeichnet. Man unterscheidet Aräometer mit constantem Volumen oder Gewichtsaräometer und Aräometer mit constantem Gewicht oder Scalenaräometer.

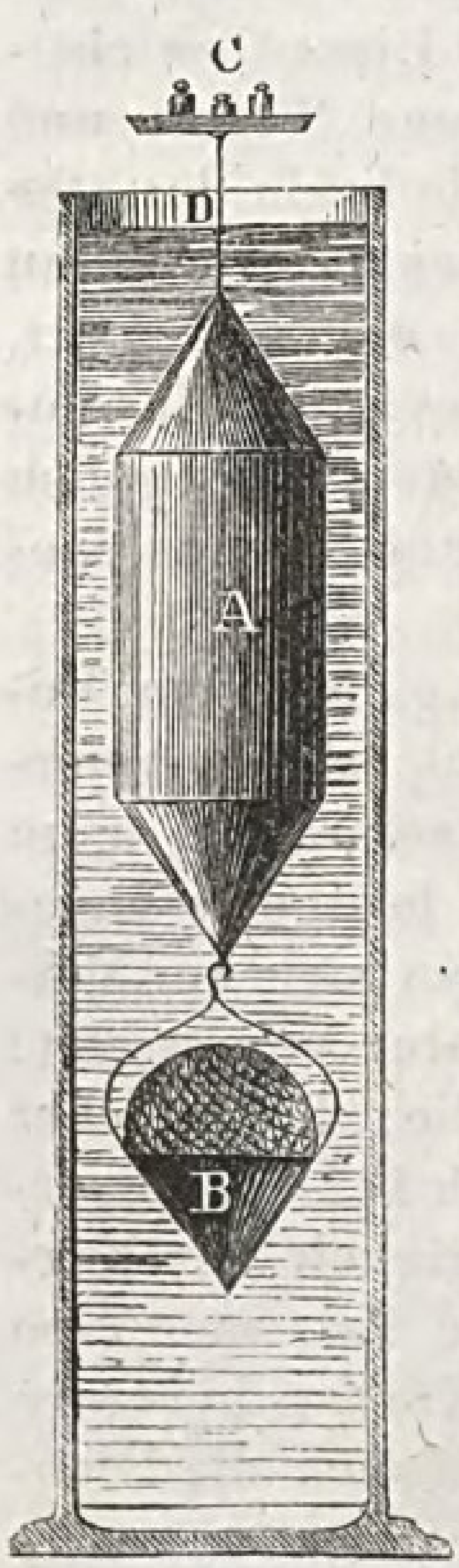


Fig. 455.

Im Allgemeinen sind die Aräometer Instrumente, die so eingerichtet sind, dass sie sowohl in Wasser, wie in anderen Flüssigkeiten schwimmen können. Diejenigen, welchen man den Namen Aräometer mit constantem Volumen gibt, müssen bei ihrem Gebrauch jedesmal mit so viel Gewichten belastet werden, dass sie in die Flüssigkeit stets gleich tief eintauchen, also immer ein und dasselbe Volumen Flüssigkeit verdrängen. Die Fig. 455 zeigt ein solches Aräometer. Es besteht aus einem hohlen und leichten Körper A, der unten einen schweren Körper B trägt, während an seinem oberen Theil mittelst eines dünnen Stabes eine Schale C befestigt ist. Auf diesem Stab ist ein Punkt D angegeben, den man gewöhnlich Marke nennt.

Wenn man dieses Aräometer in ein mit Wasser gefülltes Gefäss bringt, so schwimmt es, indem es sich vertikal stellt; der Körper B nämlich, gewöhnlich von Blei gemacht, wird so schwer genommen, dass der Schwerpunkt des ganzen Instruments immer tiefer als der des verdrängten Wassers liegt. Noch ist zu bemerken, dass, so lange die Schale C nicht mit gewissen Gewichten beladen ist, die Marke D bedeutend über die Oberfläche des Wassers herausragen muss.

Um dieses Instrument zur Bestimmung des specifischen Gewichts eines festen Körpers anzuwenden, taucht man es in ein mit Wasser gefülltes Gefäss und legt auf die Schale C so viele Gewichte als nöthig sind, dass das Instrument genau bis zur Marke D in die Flüssigkeit eintaucht. Hierauf legt man den Körper, dessen specifisches Gewicht bestimmt werden soll, auf die Schale und nimmt zu gleicher Zeit so viele Gewichte von derselben weg, dass sich der Punkt D wieder im Niveau des Wassers befindet. Die weggenommenen Gewichte geben offenbar das Gewicht des Körpers ganz so, als wenn es mittelst einer Waage bestimmt worden wäre. Man nimmt nun den Körper wieder von der Schale weg und bringt ihn in eine Art Korb, der über dem Stücke B angebracht ist und eben zur Aufnahme des Körpers dienen soll. Das Instrument sinkt nun nicht mehr bis zur Marke ein, da der Körper, welcher sich nun mitten im Wasser befindet, so viel an seinem Gewichte verloren hat, als das Gewicht des von ihm verdrängten Wassers beträgt; um das Aräometer wieder bis zur Marke eintauchen zu machen, muss man auf die obere Schale wieder Gewichte zulegen, und diese Gewichte geben offenbar das Gewicht derjenigen Menge Wasser, welche dasselbe Volumen wie der Körper hat. Man hat also nun gefunden: 1) das Gewicht des Körpers; 2) das Gewicht eines gleichgrossen Volumens Wasser; man darf also nur die erste dieser Zahlen durch die zweite dividiren, um die Dichtigkeit des Körpers zu erhalten.

Es ist leicht einzusehen, dass das Gewichtsaräometer um so empfindlicher ist und folglich um so genauere Resultate liefert je dünner der Stab ist, auf welchem man die Marke D angebracht hat. Wenn man auf der Schale C ein kleines Gewichtchen zulegt, so muss sich das Aräometer tiefer in das Wasser senken, und zwar um so viel tiefer, dass das Gewicht der Menge Wasser, welche es mehr verdrängt, gleich dem auf der Schale zugelegten Gewichte ist. Nun wird, wenn das Aräometer schon fast bis zur Marke eintaucht, eine neue Quantität Wasser von demselben

nur in der Weise verdrängt, dass ein Theil seines Stabes unter die Oberfläche des Wassers herabsinkt. Dieser Theil muss also um so länger und folglich die Senkung des Instruments um so merkbarer sein, je kleiner der Querschnitt des Stabes ist. Wenn z. B. der Querschnitt des Stabs einen Quadrat-Millimeter betrüge, so müsste die Hinzufügung von einem Milligramm auf der Schale den Stab um einen Millimeter tiefer eintauchen machen, weil dadurch um einen Cubik-Millimeter mehr Wasser verdrängt würde und dieses Volumen Wasser ein Milligramm wiegt.

Um mittelst des Gewichtsaräometers das specifische Gewicht einer Flüssigkeit zu bestimmen, taucht man es nacheinander in Wasser und in diese Flüssigkeit und legt jedesmal so viele Gewichte auf die obere Schale, dass das Instrument bis zur Marke eintaucht. Wenn man die Gewichte, die man auf diese Weise erhalten hat, indem das Instrument in Wasser tauchte, zu dem Gewicht des Aräometers selbst hinzufügt, so erhält man das Gewicht des Wassers, welches dasselbe verdrängt, wenn es bis zur Marke eintaucht. Das Gewicht eines gleichen Volumens der Flüssigkeit, deren Dichtigkeit bestimmt wird, erhält man offenbar, wenn man die Gewichte, welche aufgelegt wurden, als das Instrument in die Flüssigkeit tauchte, zu dem Gewichte des Instruments selbst addirt. Man bekommt also das gesuchte specifische Gewicht der Flüssigkeit, wenn man das zweite dieser Resultate durch das erste dividirt.

§. 326. Die Aräometer mit constantem Gewicht oder die Scalenaräometer können blos dazu dienen, das specifische Gewicht flüssiger Körper zu bestimmen und werden desshalb häufig auch mit dem Namen Flüssigkeitswaagen, Senkwaagen bezeichnet. Sie sind gewöhnlich von Glas und bestehen aus einem weiteren, hohlen Theil *a* (Fig. 456), der oben eine getheilte Röhre *b*, Hals genannt, unten aber eine Kugel *c* trägt, in welche Quecksilber eingegossen ist. Wenn das Instrument in eine Flüssigkeit getaucht wird, so schwimmt es in vertikaler Stellung in derselben, wobei es mehr oder weniger tief in die Flüssigkeit einsinkt. Damit es im Gleichgewicht sei, muss, wie wir wissen, das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit gleich dem Gewichte des Aräometers sein. Es wird dasselbe folglich um so tiefer in die Flüssigkeit einsinken, je geringer die Dichtigkeit derselben ist. Man sieht daraus, dass umgekehrt die Dichtigkeit der Flüssigkeit, in welche das Instrument eintaucht, durch den Punkt des Halses *b* bestimmt wird, bis zu welchem das Aräometer in dieser Flüssigkeit einsinkt.

Die Art und Weise der Eintheilung des Halses *b* eines Scalenaräometers ist sehr verschieden, je nach dem Gebrauche, zu welchem das Aräometer bestimmt ist. Wenn es unmittelbar die Dichtigkeit einer Flüssigkeit angeben soll, so schreibt man neben jedem Theilstrich der Scala die Dichtigkeit der Flüssigkeit, in welcher das Instrument bis zu diesem Strich eintaucht. In vielen Fällen hängt das specifische Gewicht einer Flüssigkeit auf's Innigste von der Zusammensetzung derselben ab. So liegt das specifische Gewicht des Weingeistes stets zwischen 0,793, dem specifischen Gewicht des absoluten Alkohols, und 1,000, dem des Wassers, und zwar um so näher an letzterem, je mehr Wasser der Weingeist enthält. Es ist daraus begreiflich, dass das Aräometer auch zur Bestimmung des Procentgehaltes des Weingeistes an Wasser oder absolutem Alkohol dienen kann. In diesem Fall heisst es Alkoholometer, und seine Scala ist dann so eingerichtet, dass der Procentgehalt des Weingeistes unmittelbar neben dem Theilstrich abgelesen werden kann, bis zu welchem das Instrument in diesem Weingeist eintaucht. In ähnlicher Weise hat man sog. Lactometer zur Untersuchung der Milch, Saccharometer zur Prüfung des Bieres u. s. w.



Fig. 456.

Am weitesten, namentlich für die Zwecke des praktischen Lebens, sind die Aräometer verbreitet, welche eine von *Baumé* zuerst angegebene, rein willkürliche Scala besitzen, und welche gewöhnlich *Baumé*'sche Aräometer genannt werden. Es gibt zwei Arten von diesen Aräometern, je nachdem sie für dichtere oder weniger dichte Flüssigkeiten als Wasser bestimmt sind. Um die Scala der ersteren, die für dichtere Flüssigkeiten als Wasser bestimmt sind, zu erhalten, taucht man das Instrument in Wasser und bezeichnet den Punkt, bis zu welchem es in demselben eintaucht, mit Null. Hierauf bringt man das Instrument in eine Flüssigkeit, welche durch Auflösung von 15 Theilen Kochsalz in 85 Theilen Wasser gebildet wird, und bezeichnet den Punkt, bis zu welchem es in dieser Flüssigkeit einsinkt, mit 15. Den Zwischenraum zwischen den so erhaltenen zwei Punkten theilt man in 15 gleiche Theile, Grade genannt, und setzt diese Theilung auch unter den Punkt, der mit 15 bezeichnet ist, fort bis zum unteren Ende des Halses. Um die Aräometer, welche für weniger dichte Flüssigkeiten als Wasser bestimmt sind, zu graduiren, bringt man sie in eine Auflösung

von 10 Theilen Kochsalz und 90 Theilen Wasser und bezeichnet den Punkt, bis zu welchem sie eintauchen, mit Null; hierauf setzt man sie in reines Wasser und schreibt an die Stelle, bis zu welcher sie in diesem einsinken, die Zahl 10. Den Zwischenraum zwischen diesen beiden Punkten theilt man in 10 gleiche Theile, ebenfalls Grade genannt, und verlängert die Theilung über den Theilstrich 10 hinaus bis an das obere Ende des Halses.

§. 327. **Schiffe und Kähne.** — Die Schiffe und Kähne, deren man sich für den Transport zu Wasser bedient, sind nichts anderes als schwimmende Körper, welche durch den Auftrieb, den die Flüssigkeit auf den eingetauchten Theil ihrer äusseren Oberfläche ausübt, über der Oberfläche des Wassers gehalten werden. Sie müssen also so viel Wasser verdrängen, dass das Gewicht desselben gleich ihrem eigenen Gewicht ist. Man sieht daraus, dass das Gewicht eines Schiffes, einschliesslich seiner Ladung, eine beliebige Grösse erhalten kann; es schwimmt stets auf dem Wasser, vorausgesetzt nur, dass seine Gestalt der Art ist, dass es eine hinreichend grosse Menge Wasser verdrängt.

Damit ein Schiff möglichst stabil schwimmt, d. h. damit es nicht Gefahr läuft, auf die Seite gelegt zu werden, wenn es etwas aus seiner Gleichgewichtslage gebracht worden ist, muss sein Schwerpunkt möglichst tief liegen. Aus diesem Grunde bringt man in die untersten Räume des Schiffes schwere Körper, welche den Ballast bilden. Nichtsdestoweniger ist es gewöhnlich nicht möglich, den Schwerpunkt des Schiffes unter den des verdrängten Wassers zu bringen; es ist dies aber auch, wie in §. 323 gezeigt wurde, für die Stabilität nicht nothwendig erforderlich; es reicht hin, dass dem Schiffe eine solche Form gegeben werde, dass, wenn es etwas zur Seite geneigt wird, das Metacentrum immer über seinen Schwerpunkt zu liegen kommt.

Der Tonnengehalt eines Schiffes bestimmt sich nach der Menge Wassers, welche es verdrängen kann, ohne dabei in eine solche Lage zu kommen, die für seine Bewegung ungünstig ist; und da das Gewicht des verdrängten Wassers immer gleich dem Gewichte des ganzen Schiffes sammt Belastung ist, so drückt also der Tonnengehalt auch das Gesammtgewicht des Schiffes mit Ladung aus. Die Einheit des Gewichtes, welche man in diesem Fall zu Grunde legt, ist die Tonne gleich 1000 Kilogramm (§. 22). Ein Schiff von 200 Tonnen ist also ein solches, dessen Gesammtgewicht 200 000 Kilogramm beträgt, oder welches so tief im Wasser geht, dass es 200 Cubikmeter desselben verdrängt.

In dem Maasse, als die Ladung eines Schiffes vergrössert wird, senkt es sich tiefer ein, um eine neue Quantität Wasser zu verdrängen, welche im Verhältniss zur Zunahme der Belastung steht; die Grösse, um welche sich dabei das Schiff senkt, ist um so geringer, je grösser seine Schwimmfläche ist; diesen Namen gibt man nämlich dem horizontalen Querschnitt des Schiffes, den man erhält, wenn man sich die Horizontalebene, welche die freie Oberfläche des Wassers bildet, durch das Innere des Schiffes hindurch erweitert denkt. Wenn diese Oberfläche z. B. 100 Quadratmeter beträgt, so bringt eine Vermehrung der Ladung um 1000 Kilogramm eine Senkung des Schiffes um einen Centimeter hervor; denn in Folge der Vergrösserung der Last um 1000 Kilogramm muss das Schiff um einen Cubikmeter Wasser mehr als vorher verdrängen, und ein Cylinder, dessen Grundfläche 100 Quadratmeter ist, muss eine Höhe von einem Centimeter haben, damit sein Cubikinhalt einen Cubikmeter beträgt.

Die Zahlenbeispiele, welche wir bisher gegeben haben, setzen voraus, dass das Wasser, auf welchem das Schiff schwimmt, reines oder wenigstens gewöhnliches Wasser ist; sie sind also auf die Schifffahrt in süssem Wasser anwendbar. Die Dichtigkeit des Meerwassers ist 1,026; ein Cubikmeter dieses Wassers wiegt folglich 1026 Kilogramm, und eine solche Menge desselben, welche eine Tonne wiegt, hat nur ein Volumen von 0,975 Cubikmeter. Man sieht hieraus, auf welche Weise die vorhergehenden Resultate modificirt werden müssen, um auf die Schifffahrt im Meere angewandt werden zu können.

§. 328. Wenn ein Schiff mit grossem Tiefgang wegen zu seichten Wassers nicht in einen Hafen einlaufen kann, so hebt man es mittelst flacher Kähne, Kameele genannt, die an seine beiden Seiten gebracht werden, etwas in die Höhe. Diese Kähne sind so eingerichtet, dass sie sich an die Flanken des Schiffes anlegen können. Unter dem Kiel dieses letzteren sind Taue durchgezogen, welche sich auf beiden Seiten über die Oberfläche des Wassers erheben und an Erdwinden (§. 82) endigen, welche auf dem Verdeck der Kameele festgemacht sind. Wenn man diese Erdwinden in Thätigkeit setzt, so erhebt sich das Schiff, da nun ein Theil seines Gewichtes durch die Kameele getragen wird; diese sinken natürlich zu gleicher Zeit tiefer ein. Wenn das Schiff auf diese Weise hinreichend aus dem Wasser gehoben ist, so wird es mit den beiden Kameelen, die gleichsam ein einziges Fahrzeug mit ihm bilden, in den Hafen geführt.

Dieses Mittel, das besonders in Holland angewandt wird, besteht, wie man sieht, einfach darin, den Tiefgang eines Schiffes dadurch zu vermindern, dass man seine Schwimmfläche durch Anfügung der Kameele vergrössert; auf diese Weise verdrängt zwar das Schiff mehr Wasser, weil sein Gewicht um das Gewicht der Kameele vergrössert wird, aber das Volumen dieses Wassers erstreckt sich mehr in horizontalem Sinne, seine Tiefe wird also geringer als in dem Fall, wo das Schiff noch allein schwamm.

§. 329. **Kanäle.** — Um den Transport zu Wasser auch in Gegenden zu ermöglichen, wo keine schiffbaren Flüsse vorhanden sind, gräbt man Kanäle, die mit Schiffen befahren werden können. Gewöhnlich ist das Wasser in diesen Kanälen ein stehendes und dann ist seine Oberfläche eben und horizontal. Manchmal jedoch fliesst es auch in denselben mit einer Geschwindigkeit, die mit der in Flüssen zu beobachtenden verglichen werden kann; wenn dies der Fall ist, so muss seine Oberfläche, wie wir bald sehen werden, eine gewisse Neigung haben; diese Neigung ist aber immer nur ausserordentlich klein. Es scheint demnach auf den ersten Anblick, dass ein Kanal nur in einem ganz flachen Lande angelegt werden könne, wenn sich das Niveau des Wassers an gewissen Stellen nicht zu weit von der Oberfläche des umgebenden Terrains entfernen soll, was in jedem Fall grosse Schwierigkeiten verschiedener Art darbietet. Dem ist glücklicher Weise nicht so: Es kann in jedem Lande, wenn es nicht sehr grosse und rasch wechselnde Höhenunterschiede darbietet, ein Kanal angelegt werden, ohne dass sich die Oberfläche des Wassers in demselben zu sehr von der Oberfläche des benachbarten Bodens entfernt.

Um aber dies zu erreichen, muss man den ganzen Kanal aus mehreren Abtheilungen, Haltungen genannt, zusammensetzen, die unmittelbar eine auf die andere folgen, und in welchen das Wasser verschieden hoch steht. Diese Haltungen werden durch sog. Schleusen miteinander in Verbindung gesetzt, welche dazu bestimmt sind, die Schiffe von einem Niveau auf ein anderes, höher oder tiefer gelegenes zu bringen. Es sei A (Fig. 457) die obere, B die untere, d. h. tiefer gelegene von zwei auf einander folgenden Haltungen. Die Schleuse selbst besteht aus einem Stück Kanal C, Schleusenkammer genannt, welches von den beiden Haltungen A und B durch zwei Schleusenthore D und E getrennt wird, die nach Belieben geöffnet und geschlossen werden können, und mittels deren man folglich die Schleusenkammer mit der einen oder andern der beiden Haltungen in Verbindung

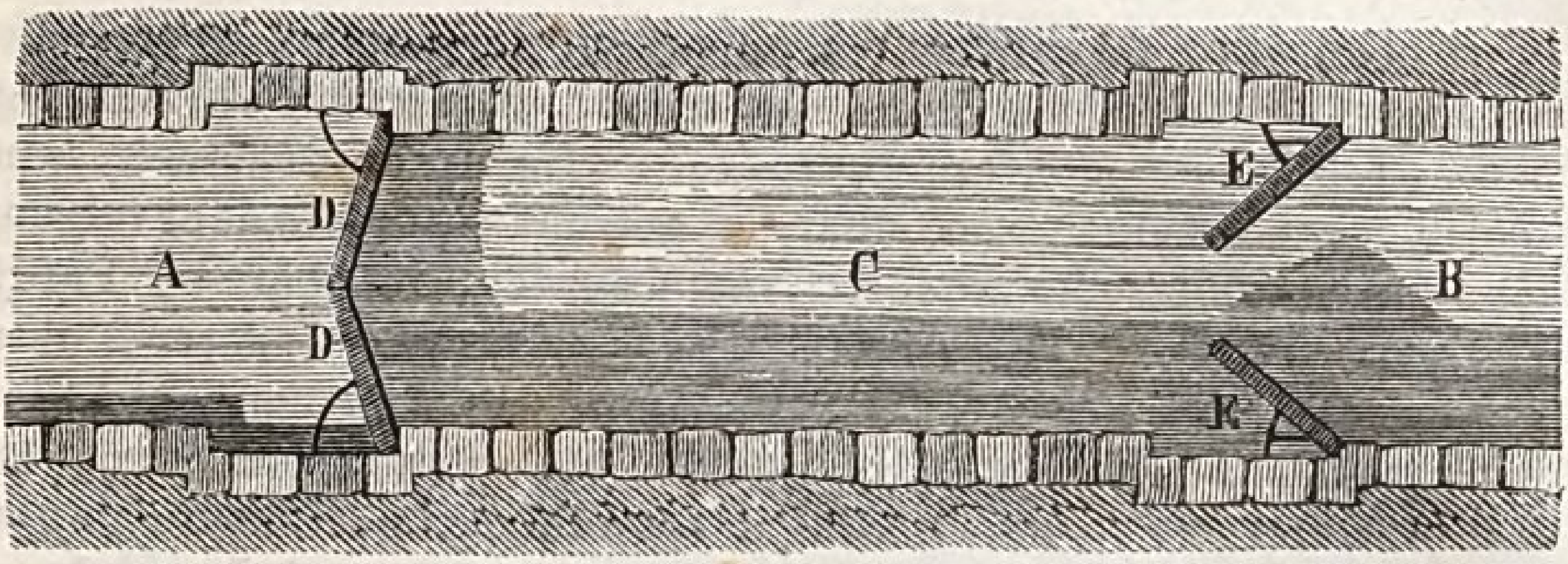


Fig. 457.

setzen kann. Die Dimensionen der Kammer C müssen, sowohl ihrer Breite als ihrer Länge nach, so gross genommen werden, dass sie die grössten Schiffe, welche den Kanal befahren sollen, noch aufzunehmen im Stande ist. Was die Tiefe der Kammer betrifft, so muss dieselbe so sein, dass die Schiffe noch in die Kammer gelangen können, wenn die Oberfläche des Wassers in ihr in gleicher Höhe mit der des Wassers in der unteren Haltung steht: die Wände der Kammer endlich müssen sich so hoch erheben, dass sie nicht überschwemmt werden können, wenn die Kammer mit der oberen Haltung in Verbindung gesetzt wird.

Um ein Schiff von der unteren Haltung B in die obere A überzuführen, schliesst man das Thor D und öffnet das E. Da alsdann das Wasser in B und C gleich hoch steht, so kann das Schiff in die Kammer C einfahren. Wenn dies geschehen ist, schliesst man das Thor E und setzt die Kammer mit der oberen Haltung in Verbindung; dadurch steigt das Wasser in der Kammer und hebt natürlich das Schiff mit in die Höhe. Wenn auf diese Weise das Niveau in C und A in gleicher Höhe ist, öffnet man das Thor D und lässt das Schiff in der oberen Haltung weiter fahren.

Durch das gerade umgekehrte Verfahren kann ein Schiff von A nach B herabgelassen werden. Wenn das Thor E geschlossen und das Thor D offen ist, so steht das Wasser in A und C gleich hoch; das Schiff kann also in die Kammer einfahren. Hierauf schliesst man das Thor D und setzt die Kammer mit der Haltung B in Verbindung, sodass sich das Wasser allmählich aus der Kammer entleert und seine Oberfläche mehr und mehr herabsinkt, bis sie mit der des Wassers in der Haltung B in gleicher Höhe steht. Dann öffnet man das Thor E und das Schiff kann nun ungehindert weiter fahren.

Man sieht also, dass jedesmal, wenn ein Schiff durch die Schleuse geht, sei es nun von oben nach unten, oder von unten

nach oben, eine Quantität Wasser gleich derjenigen, welche die Schleusenkammer fasst, aus der oberen in die untere Haltung abfliesst. Wenn mehrere Haltungen, alle durch Schleusen von gleichen Dimensionen von einander getrennt, auf einander folgen, eine immer unter der anderen, so erfordert offenbar die Fahrt eines Schiffes von einem Ende des Kanals zum anderen, dass sich im Ganzen aus der obersten Haltung in die unterste diejenige Menge Wasser ergiesst, welche eine Schleusenkammer zu fassen vermag. Wenn ein Kanal einen Berg übersteigen muss, indem er sich an dem einen Abhang desselben erhebt und an dem entgegengesetzten wieder herabsenkt, so ist auf der Höhe des Berges eine Haltung vorhanden, die über allen anderen gelegen ist. Diese Haltung muss offenbar die für den Durchgang eines Schiffes durch die Schleusen nöthige Menge Wassers liefern, sowohl wenn dieses Schiff auf der einen Seite emporsteigt, als wenn es auf der anderen wieder herabgeht. Es ist also nothwendig, dass diese oberste Haltung fortwährend mit neuem Wasser versehen oder, wie man sagt, gespeist wird, wozu man entweder fliessende Gewässer, Quellen, Bäche etc., wenn solche vorhanden sind, oder auch das Regenwasser, das man in grossen Reservoirs auffängt, benützt. Um den Verlust an Wasser, welchen der Durchgang eines Schiffes durch die Schleuse veranlasst, so gering als möglich zu machen, gibt man den Schleusenkammern so kleine Dimensionen, dass sie eben nur noch gross genug sind, um die grössten Schiffe, welche den Kanal befahren sollen, noch aufnehmen zu können.

§. 330. Wir haben oben gesagt, dass, wenn ein Schiff aus der unteren Haltung B in die Schleusenkammer C gelangt ist, das Thor E geschlossen und die Verbindung zwischen der Kammer und der oberen Haltung A hergestellt werden muss, damit das Niveau des Wassers in der Kammer gehoben und auf gleiche Höhe mit dem in der oberen Haltung gebracht wird. Man könnte glauben, dass das letztere einfach dadurch geschehen könnte, dass man das Thor D öffnet; aber bei einiger Ueberlegung sieht man leicht, dass die Oeffnung des Thores D, bevor die Oberfläche des Wassers zu beiden Seiten desselben gleich hoch steht, nur mit grosser Schwierigkeit geschehen könnte. Nehmen wir, um ein bestimmtes Beispiel vor Augen zu haben, an, dass jeder der beiden Flügel, aus denen ein Schleusenthor besteht, 2 Meter breit sei und dass die Oberfläche des Wassers in der oberen Haltung 2 Meter über der Oberfläche in der Kammer stehe; so folgt aus dem, was in §. 278 gesagt wurde, dass der Druck, welchen jeder

Flügel des Thores D von Seite des Wassers in der oberen Haltung zu erleiden hat, gleich dem Gewichte eines Wasserprisma's ist, dessen Grundfläche 4 Quadratmeter und dessen Höhe einen Meter, die Höhe des Wasserspiegels in der oberen Haltung über dem Schwerpunkt der gedrückten Fläche, beträgt; dieser Druck ist also gleich 4000^k und bringt dieselbe Wirkung hervor, wie eine Kraft von dieser Grösse, die in einem Punkte des Flügels angreift, der in der Vertikalen, welche durch die Mitte dieses Flügels geht, im dritten Theil dieser Linie, vom unteren Wasserspiegel an gemessen, gelegen ist (§. 279). Man sieht daraus, dass man, um das Thor zu öffnen und den Druck, der dasselbe geschlossen hält, zu überwinden, eine ausserordentlich grosse Kraft aufzubieten hätte. Damit die beiden Flügel eines Thores einen solchen Druck auszuhalten vermögen, müssen sie sehr stark gebaut sein; überdies richtet man sie so ein, dass sie, wenn sie geschlossen sind, nach der Seite hin, von welcher der Druck stattfindet, einen ausspringenden Winkel mit einander bilden (Fig. 457); auf diese Weise sieht man, dass das Thor der Wirkung des Wasserdruckes nicht nachgeben kann, ohne dass die Mauern, welche die Wände der Schleusenkammer bilden, von einander entfernt würden.

Um es zu vermeiden, den ausserordentlich grossen Widerstand, von dem wir eben gesprochen haben, überwinden zu müssen, öffnet man das Thor einer Schleuse nicht eher, als bis das Wasser zu beiden Seiten desselben gleich hoch steht, muss aber dann natürlich die Verbindung zwischen den Flüssigkeiten zu beiden Seiten des Thores auf andere Weise herstellen. Dieser Zweck wird durch das Aufziehen einer Art von Schütze erreicht, welche eine Oeffnung, die an dem unteren Theil jedes Thorflügels angebracht ist, verschliesst. Diese Schütze ist an einer Zahnstange von Eisen befestigt, die sich bis über den oberen Rand des Flügels erhebt und in welche ein Trieb eingreift, das durch eine Kurbel herumgedreht werden kann. Indem man auf diese Kurbel wirkt, kann die Schütze ohne grosse Mühe aufgezogen werden (Fig. 458). Durch die dadurch dargebotene Oeffnung ergiesst sich das Wasser aus der oberen Haltung in die Schleusenkammer; dadurch hebt sich in letzterer die Oberfläche des Wassers allmählich und erst, wenn sie dieselbe Höhe wie in der oberen Haltung erreicht hat, wird das Thor aufgemacht.

Um das Wasser aus der gefüllten Kammer in die untere Haltung abfliessen lassen zu können, bevor man das zwischen diesen beiden Abtheilungen befindliche Thor öffnet, besitzt dieses

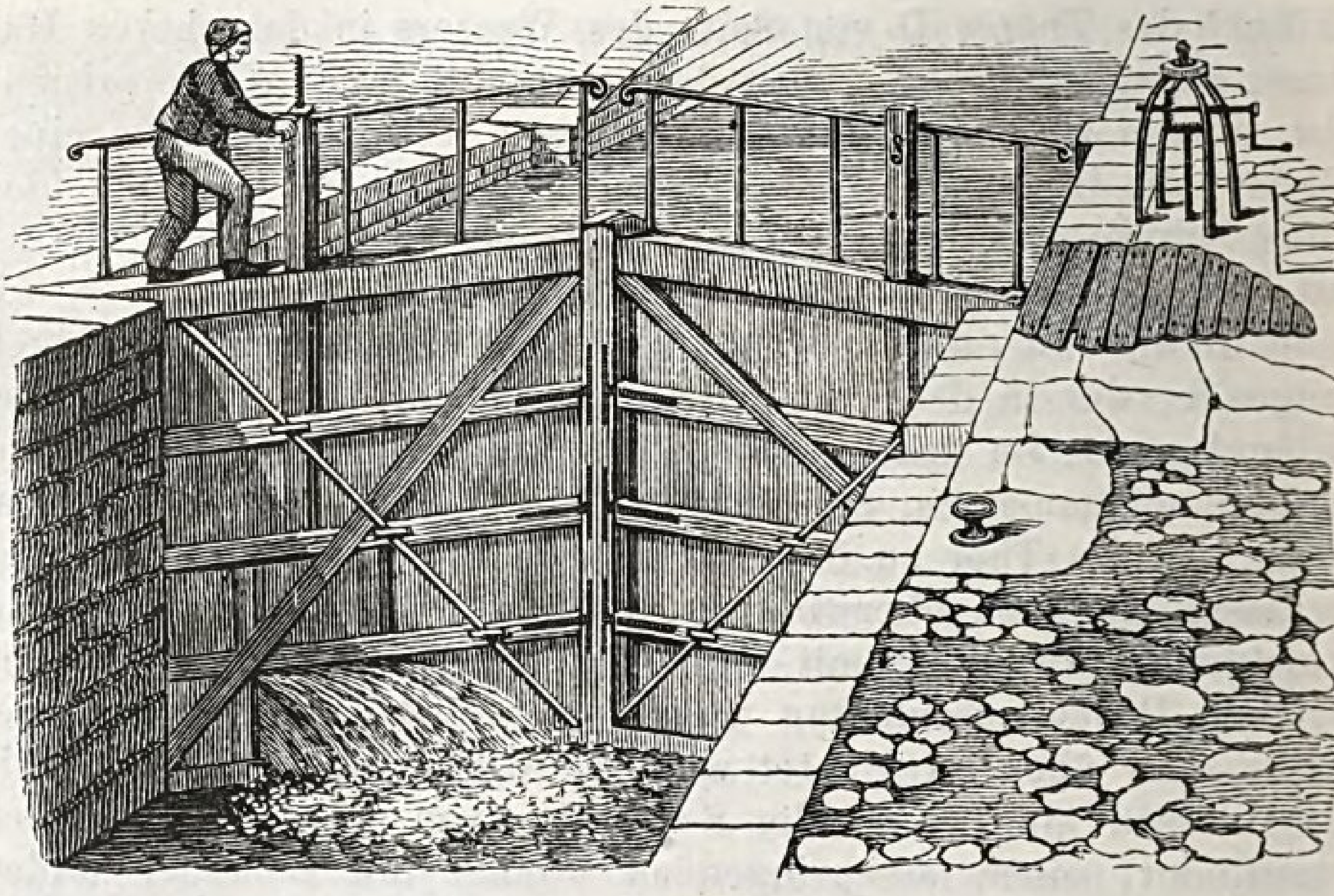


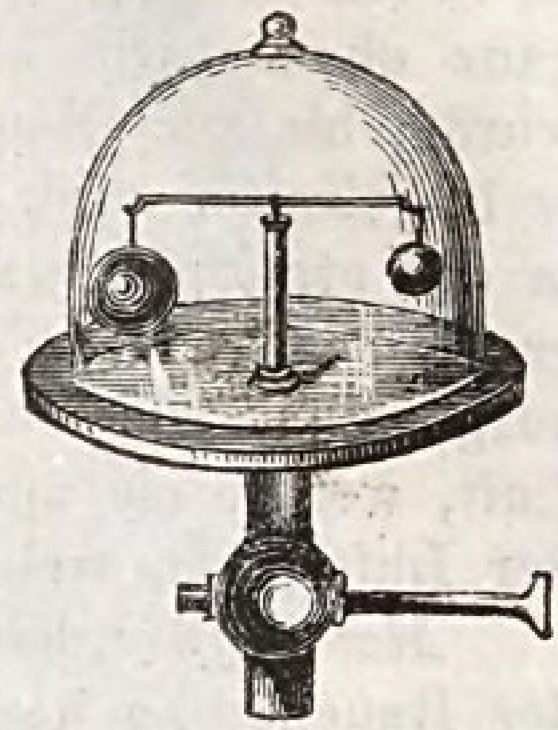
Fig. 458.

Thor eine ganz ähnliche Einrichtung wie die, welche soeben beschrieben wurde.

§. 331. **Einfluss der atmosphärischen Luft auf das Gewicht eines Körpers.** — Alle Körper, von denen wir umgeben sind, befinden sich in der atmosphärischen Luft und haben folglich in jedem Punkte ihrer Oberfläche einen Druck von Seite derselben zu erleiden, ähnlich wie ein Körper, der in eine Flüssigkeit eingetaucht ist. Man kann für diesen Fall ganz dieselbe Betrachtungsweise wie in §. 319 anwenden und gelangt, wie leicht zu sehen, zu dem Resultate, dass ein Körper, der ringsum von atmosphärischer Luft umgeben ist, so viel an seinem Gewichte verliert, als das Gewicht der Luft, welche er verdrängt, beträgt.

Man kann dieses Resultat durch den folgenden Versuch wenigstens insoweit beweisen, dass ein Gewichtsverlust der Körper in der Luft überhaupt stattfindet. Zwei Messingkugeln, von denen die eine hohl, die andere massiv ist, sind so gewählt, dass sie sich, wenn sie an den Enden eines kleinen Wagbalkens aufgehängt werden (Fig. 459), das Gleichgewicht halten, sodass der Waagbalken horizontal bleibt. Der ganze Apparat wird unter den Recipienten einer Luftpumpe gestellt und die Luft aus dem letzteren ausgepumpt. Man sieht alsdann, dass das Gleichgewicht nicht mehr besteht; die hohle Kugel, die natürlich grösser als die andere ist, senkt sich und hebt die kleinere massive Kugel

in die Höhe. Die Ursache ist nach Obigem leicht einzusehen. Jede der beiden Kugeln erleidet in der Luft einen Gewichtsverlust gleich dem Gewichte der Luft, welche sie verdrängt; aber die grössere der beiden Kugeln verdrängt mehr Luft als die andere; sie erfährt also eine grössere Verminderung ihres Gewichtes als diese. Wenn sich folglich die beiden Kugeln, indem sie sich noch in der Luft befinden und die oben besprochenen Verminderungen ihres Gewichtes erleiden, an dem Waagbalken das Gleichgewicht halten, so ist in Wirklichkeit das Gewicht der grösseren von ihnen grösser als das der kleineren. Das Gleichgewicht kann also nicht mehr stattfinden, wenn man die Luft, von der sie umgeben sind, entfernt und sie damit dem Einfluss des Auftriebs, welchen dieselbe auf sie ausübt, entzieht.


Fig. 459.

Wenn man sehr feine Wiegungen auszuführen hat, die ein sehr genaues Resultat liefern sollen, so muss man den Gewichtsverlust, welchen die Körper in der Luft erleiden, mit in Rechnung ziehen. Aber diese Verminderung des Gewichtes ist nur sehr gering, was sogleich in die Augen fällt, wenn man bedenkt, dass ein Liter atmosphärischer Luft bei einer Temperatur von 0^{0} und einem Barometerstande von $0^{m},76$ blos $1^{gr},3$ wiegt; überdies ist nicht zu vergessen, dass die Gewichte, welche zum Wiegen benützt werden, gleichfalls einen Auftrieb erleiden, sodass eigentlich blos die Differenz zwischen dem Auftrieb des zu wiegenden Körpers und dem der Gewichte in Betracht zu ziehen ist. Desshalb kann der Einfluss der Luft auf das Gewicht eines Körpers in den meisten Fällen und namentlich, wo es sich um Zwecke des praktischen Lebens handelt, vernachlässigt, also das durch Wiegen in der Luft gefundene Gewicht eines Körpers so betrachtet werden, als ob es im luftleeren Raum erhalten worden wäre.

§. 332. **Der Luftballon.** — Da ein Körper, welcher ringsum von Luft umgeben ist, von dieser einen Auftrieb gleich dem Gewichte der Luftmasse, welche er verdrängt, zu erleiden hat, so ist klar, dass er in dem Falle, wo sein Gewicht diesem Auftrieb genau gleich ist, in der Luft schwebend erhalten wird. Dies ist in der That bei den Wolken der Fall, die aus diesem Grunde in gewisser Höhe über der Oberfläche der Erde schweben; sie werden durch die atmosphärische Luft getragen. Wenn die

Luft plötzlich verschwände, so würden die Wolken in demselben Augenblick herabfallen, ganz so wie ein Stein oder eine Bleikugel.

Wenn das Gewicht eines Körpers kleiner als das Gewicht der Luft ist, welche er verdrängt, so überwiegt die Kraft, welche von unten nach oben auf ihn wirkt, diejenige, mit welcher er zu fallen sucht; er wird sich also in der Atmosphäre erheben, ganz ebenso wie ein Stück Kork, welches in Wasser getaucht wurde, bis zur Oberfläche dieser Flüssigkeit emporsteigt, sobald es losgelassen wird. Aus demselben Grunde sehen wir den Rauch in der atmosphärischen Luft emporsteigen; die Gase, aus denen er zum grössten Theil besteht und welche durch die Wärme ausgedehnt wurden, haben eine geringere Dichtigkeit als die Luft, welche sie umgibt; ihr Gewicht ist folglich kleiner als das der Luftmasse, welche sie verdrängen.

Montgolfier hatte zuerst die Idee, die aufsteigende Kraft des Rauches zu benützen, um schwere Körper, selbst Menschen in der Atmosphäre aufsteigen zu lassen. Zu diesem Ende verfertigte er aus möglichst leichtem, aber haltbarem Stoffe eine Hülle, die aufgebläht die Gestalt einer Kugel von grossem Durchmesser annahm; diese Hülle war überall vollständig geschlossen, ausgenommen an ihrer untersten Seite, wo eine kreisrunde Oeffnung gelassen war. Als man unter dieser Oeffnung ein Strohfeuer machte, sah man den ganzen Apparat sich erheben und, nachdem er eine bedeutende Höhe erreicht hatte, nach Verfluss einiger Zeit wieder herabfallen. Dieses Experiment wurde am 5. Juni 1783 zu Annonay zum erstenmale öffentlich gemacht; von diesem Tage datirt sich also die Erfindung des Luftballons.

Wenn das Gewicht der Montgolfière (so nennt man den von *Montgolfier* erfundenen Luftballon auch manchmal) mit Einschluss des Gewichts des Gases, welches der Ballon enthält, bedeutend geringer als das Gewicht der verdrängten Luft ist, so ist klar, dass der Luftballon im Stande ist, auch noch andere schwere Körper, welche man an seinem unteren Theil befestigt, mit sich in die Höhe zu heben; das Experiment wurde gleich nach Erfindung des Luftballons mehrmals gemacht und gelang immer vollständig. Bald entschlossen sich daher auch Menschen mit ihm in die Höhe zu steigen. Die ersten, welche diese ganz neue Art von Reise unternahmen, waren *Pilâtre de Roziers* und der Marquis *d'Arlandes*. Ihre Montgolfière (Fig. 460), welche prachtvoll ausgeschmückt war, endigte sich unten in eine kreisrunde Gallerie, welche die Reisenden aufnehmen konnte. Innerhalb derselben war, noch im Bereich der Hände der Reisenden, eine Kohlen-

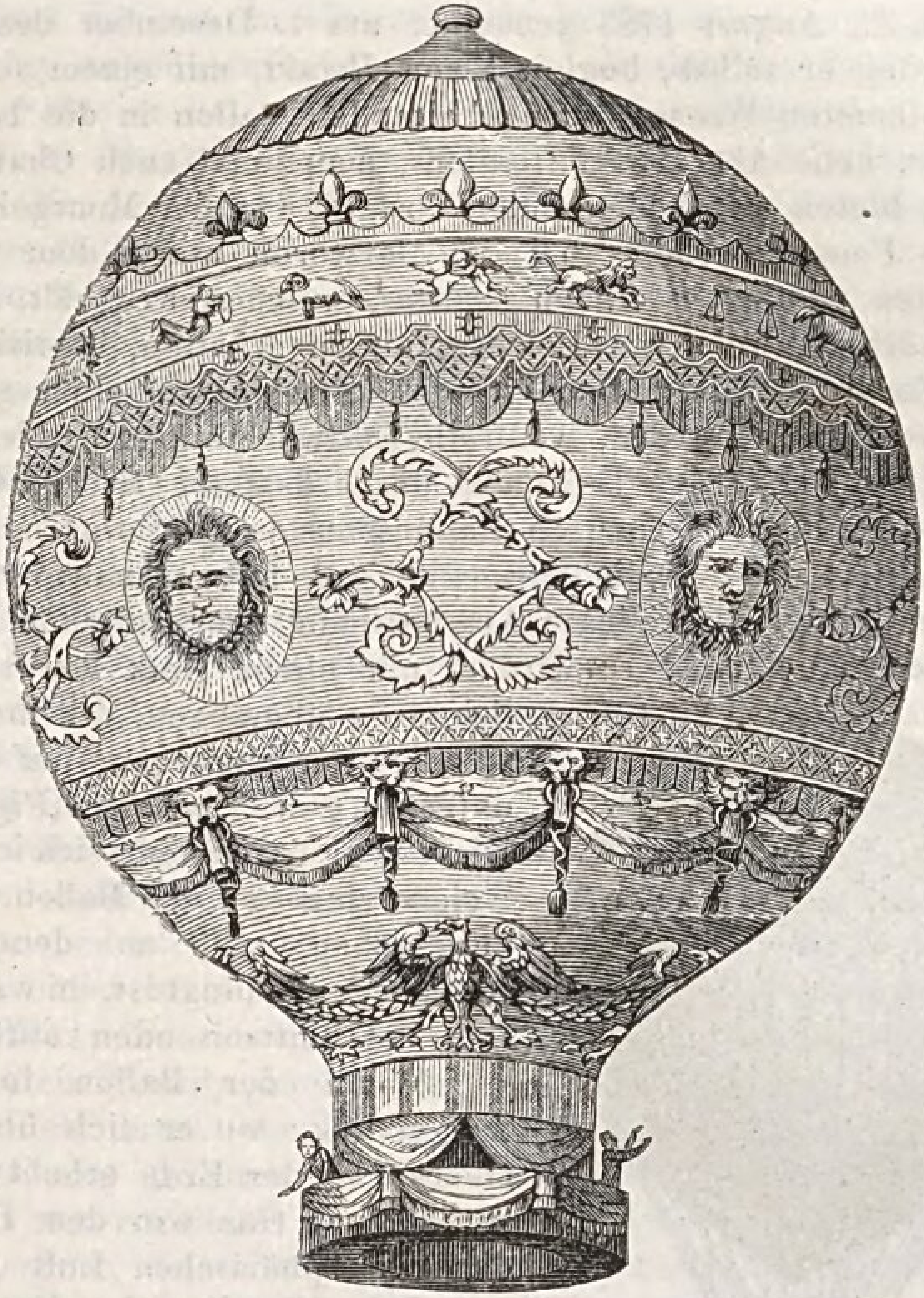


Fig. 460.

pfanne aufgehängt, sodass sie von Zeit zu Zeit ein Feuer von Stroh, von dem sie einen Vorrath mitgenommen hatten, abbrennen und dadurch dem Ballon die Steigkraft wiedergeben konnten, welche er allmählich in Folge der Erkältung verlor. Diese denkwürdige Erhebung fand ohne Unfall am 21. November 1783 in dem Garten de la Muette in der Nähe von Paris statt.

§. 333. Anstatt mit Rauch oder mit erwärmter Luft kann man den Ballon auch mit einem Gase füllen, das, wie z. B. das Wasserstoffgas, von Natur schon leichter als atmosphärische Luft ist. Diese Idee wurde zuerst von *Charles*, einem bekannten Physiker, Professor zu Paris, praktisch ausgeführt; der erste öffentliche Versuch wurde von demselben in Paris auf dem Mars-

felde am 27. August 1783 gemacht; am 1. December desselben Jahres stieg er selbst, begleitet von *Robert*, mit einem solchen, 500 Cubikmeter Wasserstoffgas haltenden Ballon in die Luft.

Diese neue Art von Luftballons, manchmal auch Charlièren genannt, bieten den bedeutenden Vortheil vor den Montgolfièren, dass das Feuer, welches bei den letzteren unter dem Ballon unterhalten werden muss, um das Gas, welches er enthält, immer in der nöthigen relativen Leichtigkeit zu erhalten, beseitigt ist. Dieses Feuer erfordert einerseits das Mitschleppen einer grossen Menge von Brennmaterial, wenn die Luftreise einige Ausdehnung erhalten soll; andererseits ist man durch dasselbe stets der Gefahr einer Entzündung des ganzen Ballons ausgesetzt, was natürlich für die Luftreisenden die schrecklichsten Folgen haben würde.

Wenn ein Ballon dieser Art bestimmt ist, Reisende mit in die Höhe zu nehmen, so wird er mit einem Netz von starken Schnüren überzogen, die ihn vollständig, ausgenommen auf seiner untersten Seite, bedecken (Fig. 461). Diese Schnüre endigen sich in Seile, welche rings um den Ballon herum herabgehen und an denen ein Nachen aufgehängt ist, in welchem sich die Luftreisenden aufhalten.

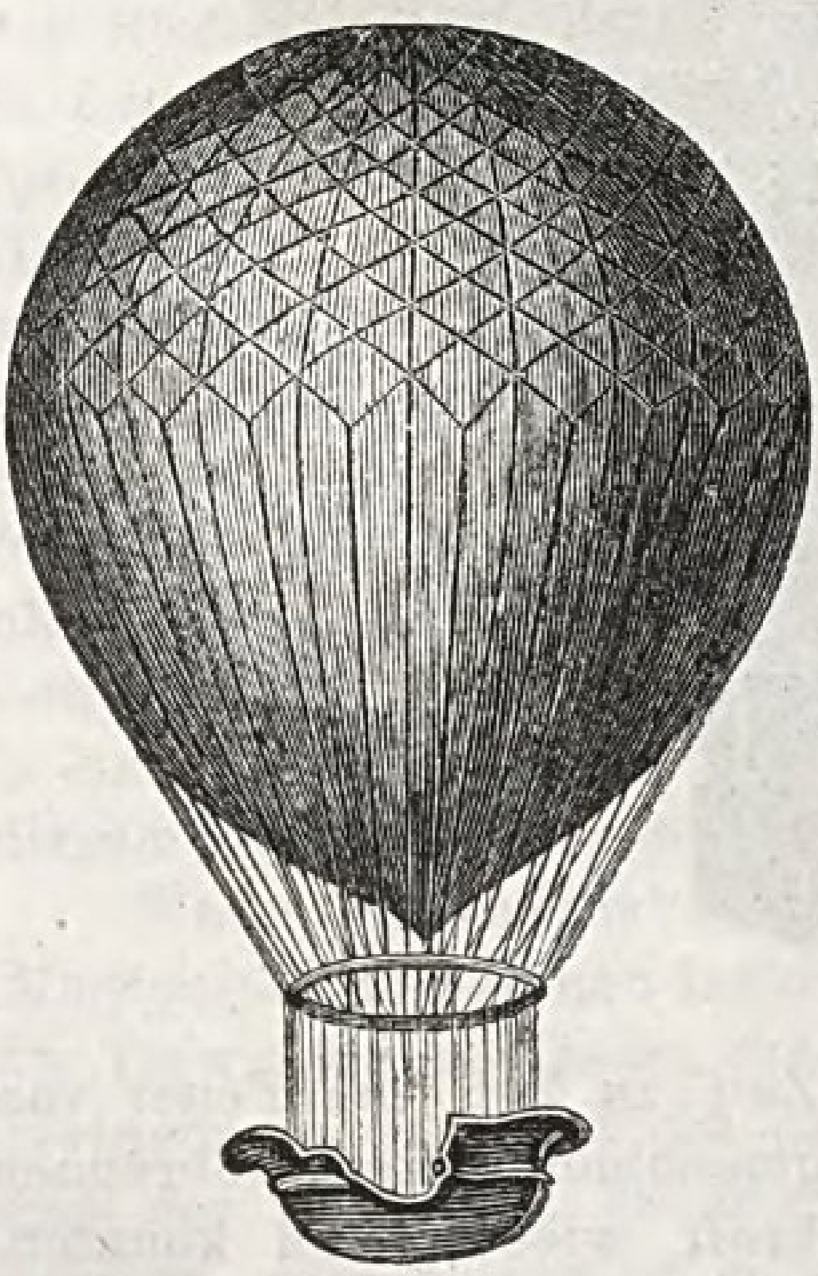


Fig 461.

Wenn der Ballon in dem Augenblick, wo er sich über die Oberfläche der Erde erhebt, vollständig mit Gas von dem Drucke der atmosphärischen Luft gefüllt und kein Mittel vorhanden wäre, später einen Theil dieses Gases nach Belieben wieder austreten zu lassen, so würden daraus schwere Unfälle hervorgehen können. In dem Maasse als sich der Ballon erhebt, gelangt er in Luftschichten, in denen der Druck der Luft immer schwächer und schwächer wird. Der Druck, welcher von aussen her, von Seite der atmosphärischen Luft auf den Ballon ausgeübt wird, vermindert sich also mehr und mehr, während der von innen nach aussen stattfindende, durch die Spannung des in dem Ballon enthaltenen Gases hervorgebrachte die nämliche Stärke behält. Während also anfangs die Umhüllung des Ballons von beiden Seiten her gleich stark gedrückt wird,

überwiegt der von innen nach aussen den in entgegengesetzter Richtung ausgeübten in dem Maasse, als sich der Ballon in der Luft erhebt; es ist leicht einzusehen, dass in Folge eines solchen einseitigen Druckes die Umhüllung zerrissen und dadurch einer solchen Menge Gas plötzlich der Austritt gestattet werden kann, dass der Ballon auf die Erde zurückfallen muss.

Um diese Gefahr zu vermeiden, kann man zwei verschiedene Mittel anwenden. Das erste besteht darin, den Ballon anfangs nicht ganz vollständig mit dem Gase zu füllen. Wenn er sich dann erhebt und der Druck, welcher von aussen her auf ihn ausgeübt wird, allmählich kleiner wird, so dehnt sich das Gas, welches er enthält, aus und bläht dadurch den Ballon mehr und mehr auf. Es ist klar, dass, so lange derselbe den Raum, den er möglicherweise auszufüllen vermag, noch nicht ganz einnimmt, nicht zu befürchten ist, dass er in Folge des Ueberschusses des inneren Druckes zerreisst. Das zweite Mittel, das jetzt fast ausschliesslich angewandt wird, besteht darin, dem Gase auf der unteren Seite des Ballons einen freien Ausgang zu lassen, sodass es fortwährend mit der freien Luft in Verbindung steht und man folglich nicht zu befürchten hat, dass der innere Druck den äusseren bedeutend überschreitet. Ausserdem bringt man immer, in dem einen wie in dem andern Fall, an der obersten Stelle des Ballons eine ziemlich grosse Oeffnung an, welche durch eine Klappe, ein Ventil, geschlossen wird. Diese Klappe, welche für gewöhnlich durch eine Feder in Berührung mit den Rändern der Oeffnung gehalten wird und dieselbe gut verschliesst, kann mittelst einer Schnur, welche an ihr befestigt ist und soweit heruntergeht, dass sie von den Reisenden erreicht werden kann, nach Belieben geöffnet werden. Wenn man fürchtet, dass der innere Druck den äusseren zu sehr überschreitet, sei es, weil der Ballon unten gar keine Oeffnung hat, sei es, weil die Oeffnung zufällig unzureichend ist, um eine genügende Quantität Gas austreten zu lassen, so öffnet man die Klappe, bis das Gleichgewicht zwischen dem inneren und äusseren Druck wieder hergestellt und dadurch jede Bedingung der Gefahr beseitigt ist.

Die Steigkraft eines Luftballons, der vollständig aufgebläht ist, vermindert sich in dem Grade, als sich derselbe in der Atmosphäre erhebt, da die Dichtigkeit der Luft, welche er verdrängt, immer geringer und folglich das Gewicht derselben immer kleiner und kleiner wird. Allerdings wird, wie wir oben gesagt haben, ein Theil des Gases durch die Oeffnung, welche unten an dem Ballon angebracht ist. oder auch durch die obere Klappe

austreten gelassen und dadurch eine entsprechende Verminderung des Gesammtgewichtes des Ballons hervorgebracht; aber diese Verminderung gleicht die Abnahme des Auftriebs der umgebenden Luft nicht aus. Es kommt daher bald eine Zeit, wo die Steigkraft vollständig Null wird und der Ballon also in der Luftschichte, wo er sich eben befindet, stehen bleibt, oder sich doch nur in Folge des Luftstromes, der in dieser Schichte herrscht, in horizontalem Sinne fortbewegt. Um in diesem Fall den Ballon noch höher steigen zu machen, erleichtert man den Nachen, indem man den Ballast, in feinem Sand bestehend, von dem man eine bedeutende Quantität mitgenommen hat, über Bord wirft. Wenn man es dagegen dahin bringen will, dass der Ballon herabsinkt, so braucht man blos die obere Klappe auf kürzere oder längere Zeit zu öffnen. Dadurch tritt das Gas oben aus: der Ballon wird durch den äusseren Druck etwas zusammengedrückt und folglich der Auftrieb, den er seitens der atmosphärischen Luft empfängt, verringert; diese Veringerung des Auftriebs macht aber mehr aus als die durch den Austritt des Gases hervorgebrachte Verminderung des Gesammtgewichts des Ballons; der übrigbleibende Auftrieb ist folglich nicht mehr im Stande, den Ballon in derselben Höhe zu erhalten.

§. 334. Die Steigkraft eines Ballons ist aus seiner Grösse, seinem Gewichte und der Natur des Gases, mit welchem er gefüllt ist, leicht zu berechnen. Das Gewicht eines Cubikmeters Wasserstoffgas bei der Temperatur 0^0 und einem Barometerstande von $0^m,76$ beträgt 89^{gr}. Das Gewicht des nämlichen Volumens Luft ist unter denselben Umständen 1299^{gr}; die Steigkraft eines Cubikmeters Wasserstoffgas, welches sich in der atmosphärischen Luft befindet, ist demnach gleich 1210^{gr}. Um daher die Steigkraft eines mit Wasserstoffgas aufgeblähten Ballons zu finden, muss man 1210^{gr} mit der Zahl der Cubikmeter Gas, welche der Ballon enthält, multipliciren und von dem Product das Gewicht des Ballons selbst, d. h. seiner Umhüllung, nebst dem Gewicht der Schnüre, des Nachens u. s. f. abziehen; man kann auf diese Weise also auch die Grösse des Gewichts berechnen, mit welchem der Nachen belastet werden kann, ohne dass der Ballon aufhört, sich erheben zu können.

In neuerer Zeit füllt man die Luftballons gewöhnlich mit Leuchtgas, da dieses an Orten, wo die Gasbeleuchtung eingerichtet ist, auf's Leichteste zu haben ist. Leuchtgas ist aber, obwohl weniger dicht als atmosphärische Luft, doch bedeutend dichter als das Wasserstoffgas, und es ist daher begreiflich, dass

der Nachen eines mit Leuchtgas gefüllten Ballons viel weniger beladen werden darf als der eines gleich grossen mit Wasserstoffgas gefüllten. Die Dichtigkeit des Leuchtgases, wie es aus dem Gasometer genommen wird, ist sehr verschieden, weil seine Zusammensetzung nicht immer dieselbe ist; im Mittel kann sie zu 0,53 von der atmosphärischen Luft angenommen werden. Ein Cubikmeter Leuchtgas wiegt also unter denselben Umständen, wie sie oben angegeben wurden, ungefähr 688^{gr}; demnach beträgt seine Steigkraft, wenn er sich inmitten der atmosphärischen Luft befindet, ungefähr 611^{gr}. Wenn man diese Zahl mit der Anzahl der Cubikmeter des zum Füllen verwendeten Gases multiplicirt und von dem Produkt das Gewicht der Umhüllung, der Schnüre und des Nachens subtrahirt, so erhält man ein Maass für das Gewicht, welches der Ballon mit in die Höhe zu heben vermag. Man sieht zugleich, dass die Steigkraft eines Cubikmeters Leuchtgas fast nur die Hälfte von derjenigen desselben Volumens Wasserstoffgas ist; es müssen also Ballons, die mit ersterem Gas gefüllt werden, bedeutend grössere Dimensionen erhalten als die mit Wasserstoffgas gefüllten, um die nämliche Steigkraft zu bekommen.

II. Gesetze der Bewegung flüssiger und luftförmiger Körper.

§. 335. **Ausfluss einer Flüssigkeit durch eine kleine Oeffnung.** — Wenn sich eine Flüssigkeit in einem Gefässe im Gleichgewicht befindet und man bringt in der Wand des Gefässes unterhalb der freien Oberfläche der Flüssigkeit eine Oeffnung an, so wird das Gleichgewicht gestört. Der Theil der Wand, welcher, um die Oeffnung herzustellen, weggenommen werden musste, hatte, während er sich noch an seiner Stelle befand, von innen nach aussen einen stärkeren Druck zu erleiden als von aussen nach innen; aber er widerstand diesem einseitigen Druck und hielt dadurch die Flüssigkeit im Gleichgewicht; sobald er daher entfernt wird, ist die Flüssigkeit durch nichts mehr zurückgehalten und fliesst durch die ihr dargebotene Oeffnung aus.

In dem Moment, wo der Ausfluss beginnt, gehen die Flüssigkeitstheile, die einen Augenblick vorher noch in Ruhe waren, nur mit sehr kleiner Geschwindigkeit durch die Oeffnung hindurch; diese Geschwindigkeit vermehrt sich aber rasch und erreicht nach Verfluss einer sehr kurzen Zeit eine Grösse, die sie

nicht mehr überschreitet. Von da an findet der Ausfluss in regelmässiger und stetiger Weise statt; die Flüssigkeitsmoleküle im Innern des Gefässes sind sämmtlich in Bewegung, um sich der Oeffnung zu nähern; jedes von ihnen beschreibt seinen besondern Weg und nimmt im Allgemeinen eine immer grössere und grössere Geschwindigkeit an, bis es endlich bei der Oeffnung ankommt. Wenn man sich dabei alle die verschiedenen auf einander folgenden Flüssigkeitsmoleküle vorstellt, die sämmtlich den nämlichen Weg verfolgen, so bilden dieselben das, was man einen Flüssigkeitsfaden nennt.

Die Theorie zeigt, dass die Geschwindigkeit, mit welcher die Flüssigkeit aus der Oeffnung fliesst, nachdem ihre Bewegung regelmässig geworden ist, von der Richtung des Theils der Wand, in welcher die Oeffnung angebracht wurde, unabhängig ist. Ob der Ausfluss von oben nach unten (Fig. 462), oder von unten nach oben (Fig. 463), oder nach der Seite (Fig. 464) stattfindet, immer ist die Geschwindigkeit dieses Ausflusses die nämliche, wenn der vertikale Abstand AB der freien Oberfläche der Flüssigkeit über der Oeffnung derselbe bleibt. Die Theorie zeigt ferner, dass diese Geschwindigkeit, unabhängig von der Natur der Flüssigkeit, gleich derjenigen ist, welche ein schwerer Körper erreicht, wenn er vom Spiegel bis zur Ausflussöffnung, also die Höhe AB (Fig. 462), frei herabfällt.

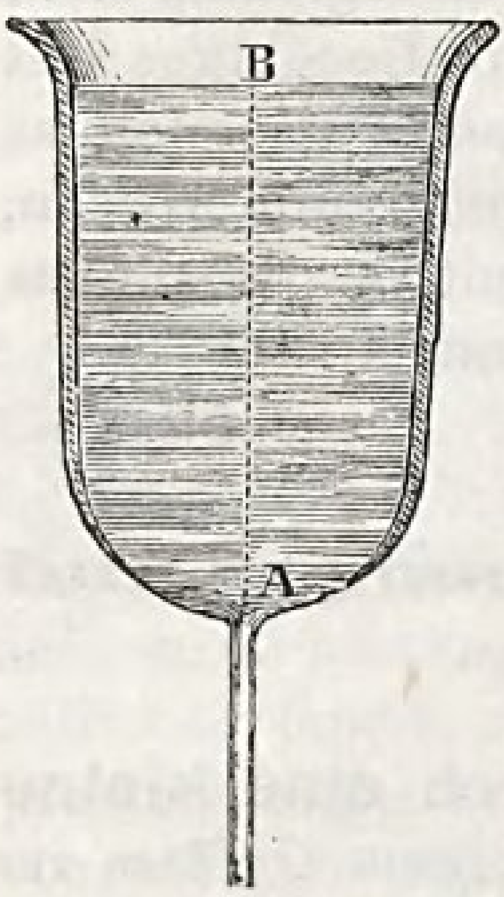


Fig. 462.

Wenn man daher diese Höhe AB, ausgedrückt in Metern, mit h und die Ausflussgeschwindigkeit mit v bezeichnet, so erhält man für v (§. 115)

$$v = \sqrt{2gh}.$$

Diese Formel gibt die Geschwindigkeit ebenfalls in Metern ausgedrückt, d. h. sie lehrt uns die Zahl der Meter kennen, welche ein Flüssigkeitsmolekül von dem Augenblick an, wo es die Oeffnung verlässt, in einer Secunde durchlaufen würde, wenn es seine Geschwindigkeit unverändert beibehielte. Die Tabelle 8 auf Seite 227 gibt die Werthe für v, wie sie der obigen Formel entsprechen, für verschiedene Werthe von h.

Der Satz, den wir soeben für die Ausflussgeschwindigkeit einer Flüssigkeit durch eine Oeffnung in der Wand des Gefässes, in welcher sie sich befindet, ausgesprochen haben, heisst gewöhnlich das *Toricelli*'sche Gesetz. Wir haben dabei stillschweigend vorausgesetzt, dass die Oeffnung im Verhältniss zur

Grösse des Gefässes nur klein sei, sodass die Abstände aller ihrer Punkte vom Spiegel der Flüssigkeit in jedem Fall als unter sich gleich angesehen werden dürfen. Im Uebrigen ist jedoch die Ausflussgeschwindigkeit von der Grösse der Oeffnung unabhängig.

§. 336. Man kann die Richtigkeit des *Toricelli*'schen Gesetzes auch durch den Versuch erweisen. Wenn der Ausfluss von unten nach oben stattfindet, wie in Fig. 463, so beobachtet man, dass sich der Flüssigkeitsstrahl, welcher aus der Oeffnung hervorspringt, beinahe bis zum Spiegel der Flüssigkeit im Gefäss erhebt. Dies kann aber nur der Fall sein, wenn die Moleküle, welche aus der Ausflussöffnung hervorkommen, eine von unten nach oben gerichtete Geschwindigkeit besitzen, welche der Höhe des Spiegels über der Ausflussöffnung entspricht. Damit der Versuch gut gelingt, muss man dem Flüssigkeitsstrahl eine kleine Neigung geben; denn ohne dieses fallen die Flüssigkeits-Moleküle, nachdem sie sich bis zu der grössten Höhe, welche sie erreichen können, erhoben hatten, auf die ihnen nachfolgenden Moleküle zurück und vermindern dadurch die aufsteigende Geschwindigkeit derselben; der Flüssigkeitsstrahl kann sich folglich nicht zu der ganzen Höhe erheben, welche seiner Ausflussgeschwindigkeit entsprechen würde. Indem man dem Strahl eine etwas schiefe Richtung gibt, vermindert man wohl die Höhe, bis zu welcher sich jedes Molekül in Folge seiner gewonnenen Geschwindigkeit erheben kann, um etwas, aber dieser Nachtheil wird durch den Vortheil, den man dadurch erhält, dass jedes Molekül eine Parabel beschreiben muss und daher nicht mehr auf die ihm nachfolgenden zurückfallen kann, mehr als aufgewogen.

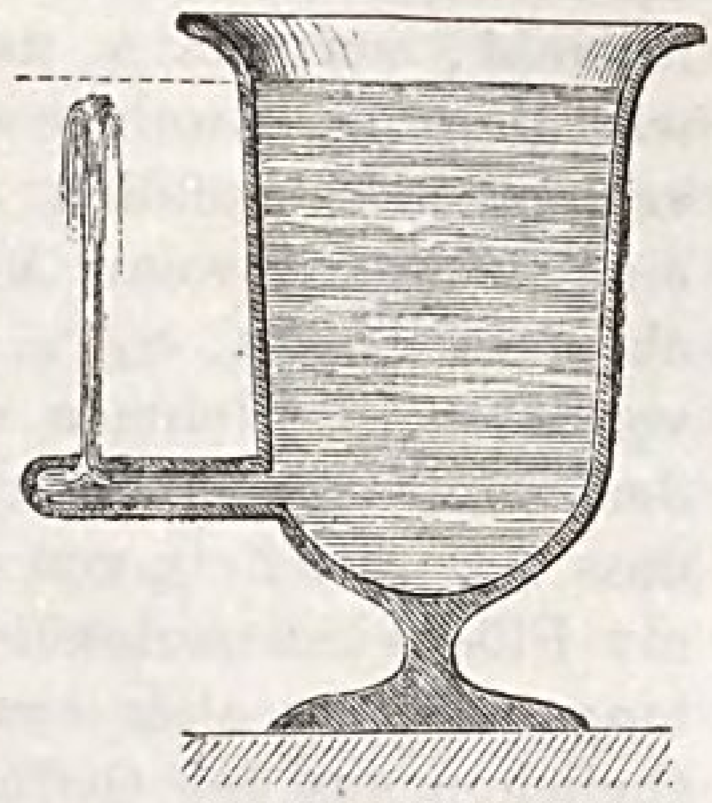


Fig. 463.

Wenn der Ausfluss nach seitwärts durch eine Oeffnung in einer vertikalen Wand stattfindet (Fig. 464), so nimmt der Flüssigkeitsstrahl die Figur einer Parabel an; die Curve,

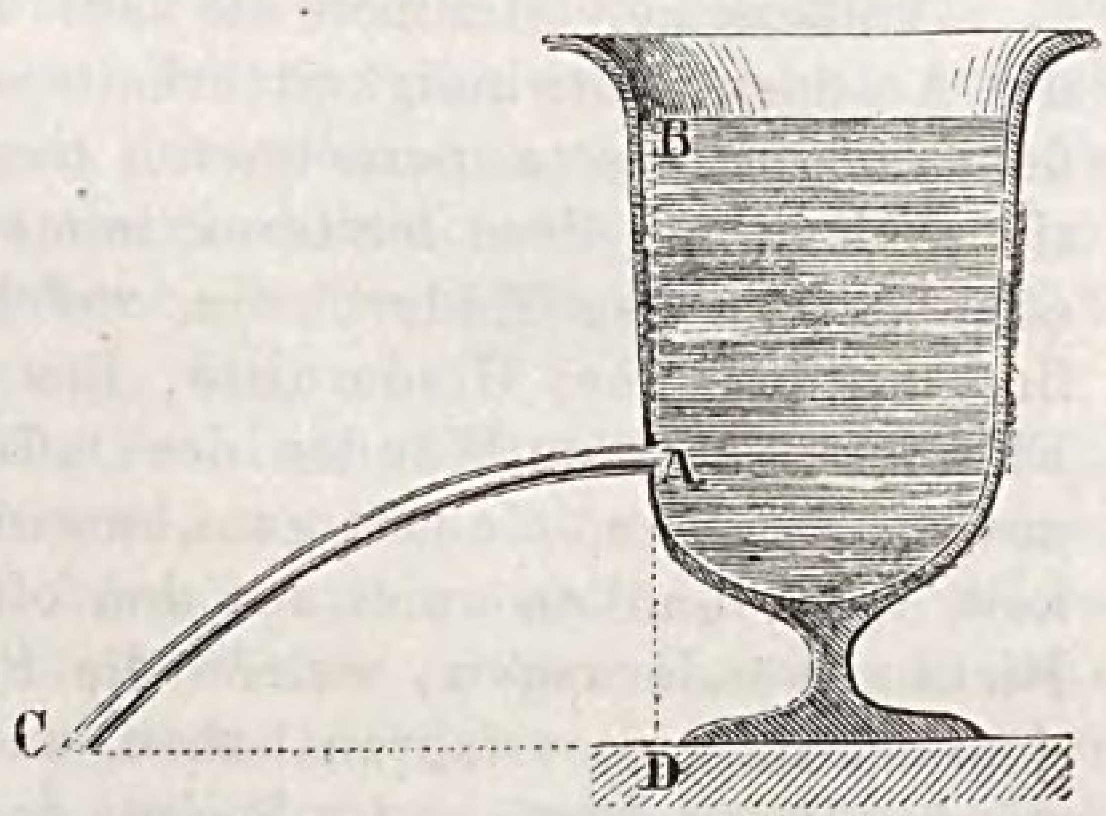


Fig. 464.

welche er bildet, ist keine andere, als diejenige, welche ein schwerer Körper beschreiben würde, der mit einer Geschwindigkeit gleich derjenigen, mit welcher die Flüssigkeit aus dem Gefäss tritt, horizontal hinausgeworfen wird. Die Form des Flüssigkeitsstrahls muss folglich auch zur Bestimmung der Ausflussgeschwindigkeit dienen können. Zu diesem Zwecke misst man 1) die horizontale Entfernung CD eines Punktes des parabolischen Strahles von der Vertikalen, welche durch die Ausflussöffnung hindurch geht, und 2) den Abstand AD der Oeffnung A über der Horizontalebene CD. Die Zeit, welche ein Flüssigkeitsmolekül braucht, um von A nach C zu gelangen, ist genau so gross wie diejenige, welche es nothwendig hätte, um die Höhe AD vertikal herabzufallen (§. 139). Diese Zeit ist folglich gerade eine Secunde, wenn AD gleich $^1/_2 g$ oder $4^m,9$ misst; sie ist aber nur $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$... Secunde wenn AD gleich $^1/_4$, $^1/_9$, $^1/_{16}$... von $4^m,9$ ist. Nehmen wir der Einfachheit halber an, dass man den Punkt C auf dem parabolischen Strahl so gewählt habe, dass AD gleich $^1/_9$ von $4^m,9$, d. h. gleich $0^m,544$ ist, so gebraucht ein Flüssigkeitsmolekül $^1/_3$ Secunde, um von A nach C zu gelangen. Wenn aber von dem Moment an, wo dieses Flüssigkeitstheilchen aus der Oeffnung heraustritt, die Schwere nicht mehr auf dasselbe wirken würde, so würde es sich horizontal mit gleichförmiger Bewegung fortbewegen und in $^1/_3$ Secunde einen Weg von der Länge CD zurücklegen (§. 139). Es ist folglich die Geschwindigkeit, mit der es aus der Oeffnung tritt, gleich 3 mal der Länge CD. Indem man auf diese Weise die Ausflussgeschwindigkeit einer Flüssigkeit durch Oeffnungen, die in verschiedenen Abständen unter der freien Oberfläche im Gefäss gelegen sind, bestimmt, findet man, dass diese Geschwindigkeiten in der That sehr annähernd durch das obige Gesetz gegeben werden.

Vollkommen stimmen die auf dem Wege des Versuchs für die Ausflussgeschwindigkeit erhaltenen Resultate mit denen aus dem obigen Gesetz berechneten theoretischen niemals überein: sie sind gegen diese letzteren immer etwas zu klein. Dies rührt offenbar von den Hindernissen, welche die Flüssigkeit beim Ausfluss erfährt, her; Hindernisse, die theils aus der Reibung der Flüssigkeit an den Wänden der Oeffnung und des Gefässes, theils aus der eigenen, niemals ganz beseitigten Klebrigkeit der Flüssigkeit, theils endlich auch aus den oft mehr oder weniger raschen Richtungsänderungen, welche die Flüssigkeitsfäden vor und bei dem Ausfluss zu erfahren haben, entspringen. Diese Hindernisse können zwar durch gutes Poliren der Wände der Ausflussöffnung,

oder dadurch, dass man die Wand an der Stelle, wo diese Oeffnung angebracht ist, sehr dünn nimmt, endlich noch dadurch, dass man die Form des Gefässes in der Nähe der Ausmündung so wählt, dass die Richtung der Flüssigkeitsfäden nur eine allmähliche Aenderung erfährt, (wie etwa in Fig. 462), sehr vermindert, aber nie völlig beseitigt werden. So hat man selbst unter den günstigsten Umständen die wirkliche Ausflussgeschwindigkeit des Wassers höchstens zu 96 bis 98 Procent von der theoretischen erhalten können. Man muss daher in jedem Fall die theoretische Ausflussgeschwindigkeit mit einer Zahl kleiner als Eins, die man gewöhnlich den Geschwindigkeits-Coëfficienten nennt, multipliciren, um die wirkliche Ausflussgeschwindigkeit zu erhalten.

§. **337.** Die Menge der Flüssigkeit, welche in einer Secunde aus der Oeffnung strömt, oder, wie man sie kurz nennt, die Ausflussmenge, hängt offenbar von der Grösse der Oeffnung und von der Ausflussgeschwindigkeit ab. Wenn die Flüssigkeit nach ihrem Austritt aus dem Gefässe der Wirkung der Schwerkraft entzogen wäre und sich allein in Folge der schon gewonnenen Geschwindigkeit bewegen würde, so würde die in einer Secunde austretende Flüssigkeitsmenge einen Cylinder bilden, dessen Höhe gleich der Ausflussgeschwindigkeit wäre. Indem man die Oeffnung selbst als Basis dieses Cylinders betrachtet, sieht man, dass die Ausflussmenge erhalten wird, wenn man den Querschnitt der Oeffnung mit der Ausflussgeschwindigkeit multiplicirt. Nun ist klar, dass die so erhaltene Ausflussmenge auch dann noch richtig ist, wenn die Flüssigkeit nach ihrem Austritt aus der Oeffnung fortfährt, der Wirkung der Schwere zu folgen; denn die Bedingungen, unter welchen der Ausfluss stattfindet, werden offenbar durch die verschiedene Umstände, unter denen sich die Flüssigkeit befinden kann, nachdem sie das Gefäss verlassen hat, in nichts geändert. Wenn also z. B. der Querschnitt der Oeffnung 2 Quadrat-Centimeter beträgt und dieselbe befindet sich $0^m,50$ unter dem Spiegel der Flüssigkeit im Gefäss, so ist die Ausflussmenge gleich 626,4 Cubik-Centimeter ($2 \times 313,2$); denn die der Höhe $0^m,50$ entsprechende Geschwindigkeit ist $3^m,132$ oder auch 313,2 Centimeter (§. 115).

Wenn die Ausflussöffnung in einer dünnen Wand angebracht ist, so ist die Flüssigkeitsmenge, welche sich wirklich in einer Secunde aus der Oeffnung ergiesst, weit unterhalb der, welche man auf die soeben angegebene Weise erhält. Die wirkliche Ausflussmenge ist nicht grösser als 0,62 der theoretischen, d. h. derjenigen, welche man erhält, wenn man den Querschnitt

der Oeffnung mit der Ausflussgeschwindigkeit multiplicirt. Sehen wir, welcher Ursache diese bedeutende Differenz zugeschrieben werden muss.

Wir haben oben gesagt, dass, wenn die Flüssigkeit nach ihrem Austritt aus dem Gefässe der Wirkung der Schwere entzogen wäre, die in einer Secunde ausfliessende Flüssigkeitsmenge einen Cylinder bilden würde, der zur Höhe die Ausflussgeschwindigkeit hat; wir haben hierauf das Volumen dieses Cylinders berechnet, indem wir die Ausflussöffnung als seine Basis annahmen. Dieser letzte Punkt ist es, bei dem wir einen Fehler begangen haben; die Basis unseres Flüssigkeits-Cylinders ist sehr erheblich kleiner, als wir vorausgesetzt haben. Die Flüssigkeitsfäden im Innern des Gefässes convergiren sämmtlich gegen die Ausflussöffnung, und diese Convergenz verschwindet natürlich nicht plötzlich in dem Augenblick, wo sie die Ausflussöffnung erreichen; sie besteht noch in einer gewissen Entfernung von dieser Oeffnung. Daraus folgt aber nothwendig, dass der Flüssigkeitsstrahl an seinem Anfang nicht die Form eines Cylinders haben kann; er zieht sich etwas zusammen, bevor er in die Cylinderform übergeht. Wir sollten also für die Basis des Cylinders, von dem wir oben gesprochen haben, eigentlich nicht den Querschnitt der Oeffnung, sondern vielmehr den Querschnitt des zusammengezogenen oder contrahirten Wasserstrahls, den sog. Contractions-Querschnitt nehmen. Man begreift nun daraus, woher es kommt, dass die wirkliche Ausflussmenge so bedeutend unter der theoretischen bleibt, wie wir oben gesehen haben. Indessen werden wir, ungeachtet des Fehlers, den wir in obiger Schlussfolgerung, durch welche wir die in einer Secunde ausfliessende Flüssigkeitsmasse fanden, begangen haben, den Namen theoretische Ausflussmenge für das Produkt aus dem Querschnitt der Oeffnung in die Ausflussgeschwindigkeit der Flüssigkeit beibehalten.

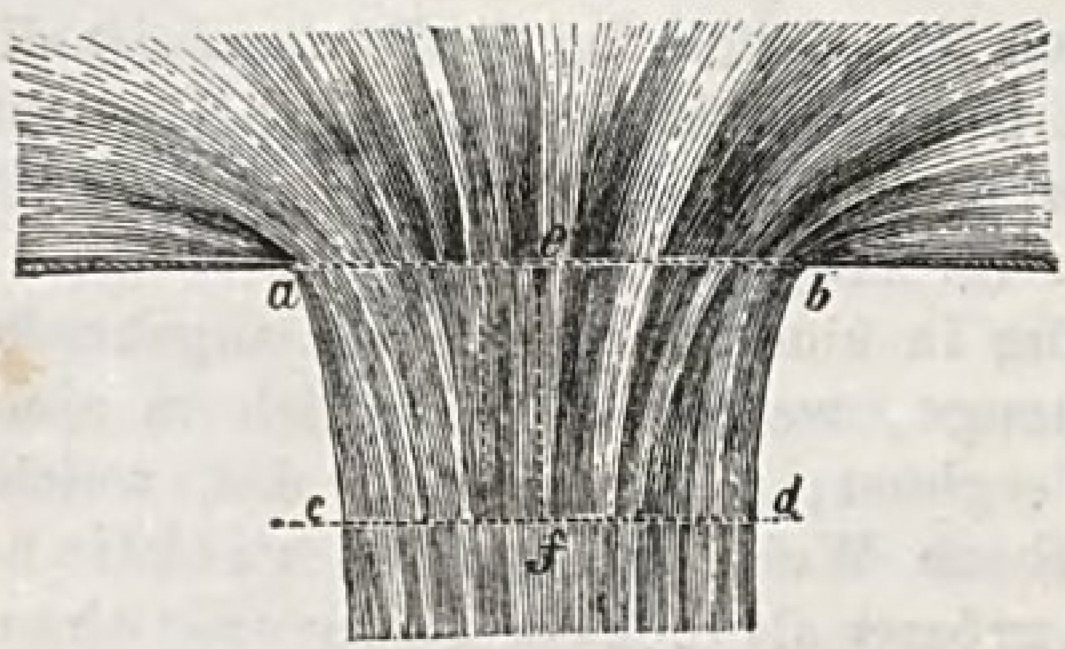


Fig. 465.

Messungen, die von verschiedenen Flüssigkeitsstrahlen, die aus kreisförmigen Oeffnungen in einer dünnen Wand hervorsprangen, angestellt wurden, ergaben im Mittel folgende Resultate: Wenn der Durchmesser *a b* (Fig. 465) der Oeffnung in 10 gleiche Theile getheilt

wird, so enthält der Durchmesser *cd* des Contractions-Querschnitts 8 solcher Theile und die Distanz *ef* dieses Querschnitts von der Oeffnung 5. Die Grösse des Contractions-Querschnitts beträgt also im Mittel 0,64 von der Grösse der Oeffnung, und wenn man diesen Querschnitt oder den 0,64sten Theil des Querschnitts der Oeffnung mit der Ausflussgeschwindigkeit multiplicirt, so erhält man ein Resultat, welches sehr nahe mit dem übereinstimmt, welches eine direkte Messung des ausfliessenden Flüssigkeitsquantums liefert. Der Unterschied des auf diese Weise berechneten Resultats (0,64 der theoretischen Ausflussmenge) und der direkt durch den Versuch bestimmten Ausflussmenge (0,62 der theoretischen) ist offenbar der schon oben berührten Verzögerung der Geschwindigkeit des Flüssigkeitsstrahls zuzuschreiben.

Man nennt die Zahl, mit welcher man die theoretische Ausflussmenge multipliciren muss, um die wirkliche zu erhalten, wie also z. B. die oben für Oeffnungen in dünner Wand angegebene Zahl 0,62, den Ausfluss-Coëfficienten. Dem Verhältniss zwischen dem Contractions-Querschnitt und dem Querschnitt der Ausflussöffnung, wie also der oben angegebenen Zahl 0,64, gibt man gewöhnlich den Namen Contractions-Coëfficient. Aus dem Vorhergehenden folgt klar genug, dass der Ausfluss-Coëfficient immer gleich dem Produkt aus dem Contractions-Coëfficienten in den Geschwindigkeits-Coëfficienten zu setzen ist.

§. 338. Vom Contractions-Querschnitt an erhält der Flüssigkeitsstrahl, je nach der Richtung, in welcher der Ausfluss erfolgt, verschiedene Formen; betrachten wir im Folgenden speciell einen vertikalen Strahl, der einer am untersten Theil eines Gefässes angebrachten Oeffnung entspringt, etwas genauer. Wir haben oben gesagt, dass der Flüssigkeitsstrahl, nachdem er sich in geringer Entfernung von der Oeffnung in der angegebenen bedeutenden Weise zusammengezogen hat, nahezu cylindrisch wird; in Wirklichkeit tritt dies für den Strahl, mit dem wir uns beschäftigen, nicht genau ein. Die Querschnitte dieses Strahls vermindern sich fortwährend in dem Maasse, als sie weiter entfernt von der Oeffnung genommen werden; der Flüssigkeitsstrahl zieht sich fortwährend zusammen bis zu dem Moment, wo er sich in Tropfen auflöst. Aber diese Zusammenziehung, welche in der ganzen Länge des Strahls stattfindet, entspringt aus einer andern Ursache als aus der Contraction, welche zunächst an der Oeffnung hervorgebracht wird. Sie ist viel geringer als diese und bei einer genauen Beobachtung des Strahls unterscheidet man gar wohl den Punkt, wo die eine aufhört und die andere beginnt.

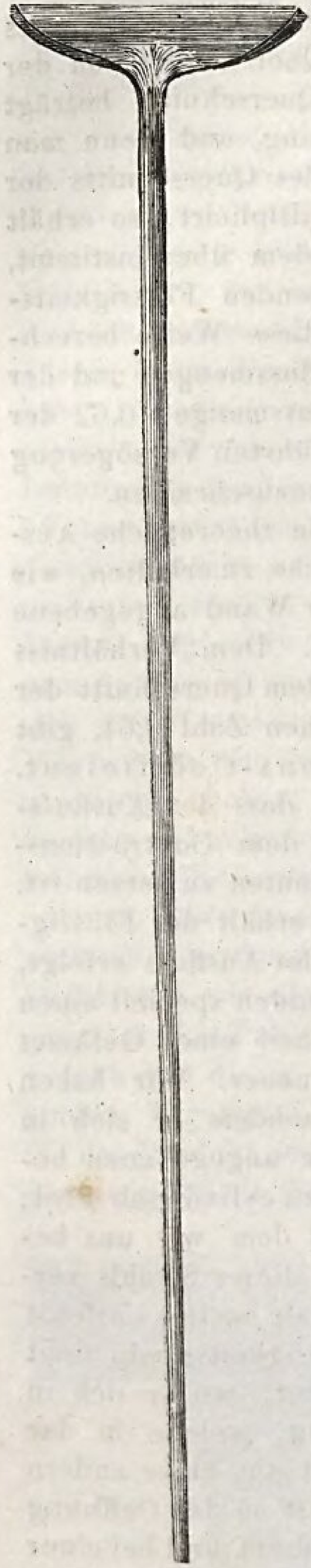


Fig 466.

Um uns von der Ursache, durch welche die Form des Strahls von einem Punkt zum andern geändert wird, Rechenschaft zu geben, denken wir uns, dass die Flüssigkeitsmoleküle isolirt von einander mit gleicher Geschwindigkeit aus der Oeffnung treten, und dass sie in unter sich gleichen Zeitintervallen, etwa in zehntel Secunden, auf einander folgen. Diese Moleküle fallen alle die nämliche Vertikale herab, und es ist leicht einzusehen, dass die Entfernungen zwischen je zweien in dem Maasse zunehmen müssen, als sie sich von der Oeffnung entfernen; denn während sie herabfallen, nimmt ihre Geschwindigkeit ja fortwährend zu und doch braucht jedes überall dieselbe Zeit, eine zehntel Secunde, um die Stelle des ihm vorhergehenden Moleküls einzunehmen. Bei dem Ausfluss einer Flüssigkeit, wie er wirklich stattfindet, sind die Flüssigkeitsmengen, welche in jeder zehntel Secunde aus der Oeffnung austreten, alle unter sich gleich. Wenn diese Flüssigkeitsmengen sich trennen würden, so dass sie isolirte Tropfen bildeten, so würden sich dieselben im Herabfallen allmählich immer weiter von einander entfernen, wie die isolirten Moleküle, von denen wir eben gesprochen haben. Aber die Flüssigkeitsmengen, welche so während jeder zehntel Secunde aus der Oeffnung hervortreten, trennen sich nicht von einander; sie bleiben zusammenhängend und bilden einen continuirlichen Strahl, und weil sich ihre gegenseitigen Entfernungen, wenn sie isolirt von einander wären, allmählich vergrössern müssten, so können sie nur unter der Bedingung mit einander vereinigt bleiben, dass sie sich, in dem Maasse, wie sie herabfallen, mehr und mehr verlängern. Diese Verlängerung aber, welche jeder Theil des Flüssigkeitsstrahls, indem er sich von der Oeffnung entfernt, erfährt, zieht nothwendig eine entsprechende Verminderung seines Querschnitts

nach sich. Dies ist die Ursache der allmählichen Verengerung des in Rede stehenden Flüssigkeitsstrahls von dem Querschnitt an, dem wir den Namen Contractions-Querschnitt gegeben haben. Die Fig. 466 soll eine Idee von der Gestalt dieses Strahls geben.

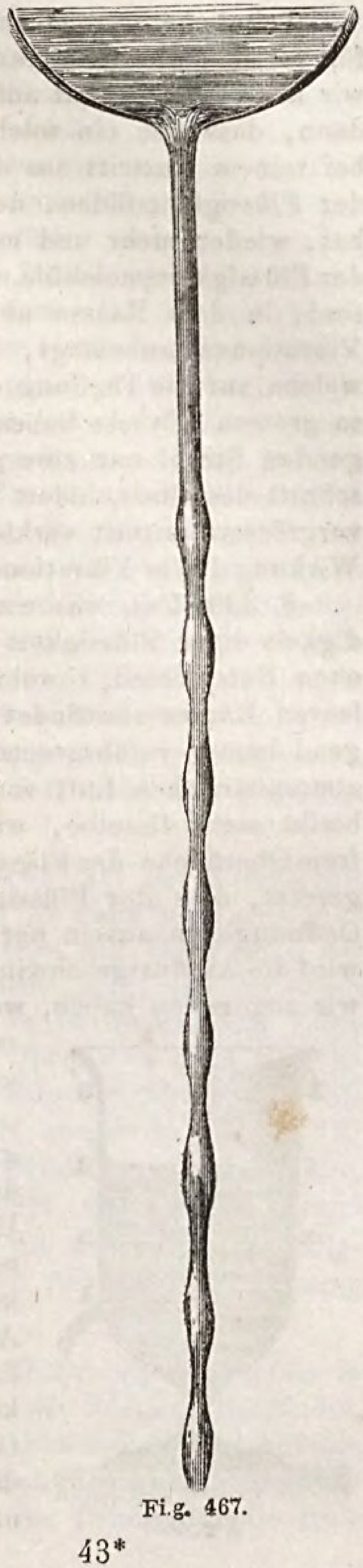


Fig. 467.

Wenn keine besonderen Ursachen vorhanden sind, welche die Form eines vertikalen Flüssigkeitsstrahls, wie wir sie soeben gefunden haben, abändern, so erhält dieser eine bedeutende Länge, indem er sich mehr und mehr ausfasert und sich erst in grosser Entfernung von der Oeffnung in Tropfen auflöst. Aber gewöhnlich entstehen auf der Oberfläche des Strahls Wellen, ähnlich denjenigen, welche man auf der Oberfläche eines ruhig stehenden Wassers beobachtet, auf welche man einen Stein fallen liess. Diese Wellen bringen aufeinanderfolgende Erweiterungen und Verengerungen des Strahls, sog. Knoten, hervor (Fig. 467), welche um so augenfälliger werden, je dünner der Strahl wird, und es tritt schon in verhältnissmässig geringer Entfernung der Fall ein, dass sich diese Knoten in Folge der vibrirenden Bewegung der Flüssigkeitstheilchen von einander entfernen und in Form von Tropfen isoliren Wenn man die Ursachen der vibrirenden Bewegung der Flüssigkeitstheilchen so viel als möglich beseitigt, so erhält man einen Strahl, der auf eine grosse Länge continuirlich bleibt; wenn man dagegen in der Luft, welche den Strahl umgibt, irgend solche Vibrationen, mittelst musikalischer Instrumente z. B., hervorruft, so sieht man, wie sich der Strahl bedeutend verkürzt und in viel geringerer Entfernung von der Oeffnung in Tropfen auflöst.

Aehnliche Betrachtungen, wie diejenigen, welche wir soeben für vertikal abwärtsgehende Strahlen angestellt haben, können wir auch bei vertikal aufwärts steigenden anwenden. Man sieht dann, dass sich ein solcher Flüssigkeitsstrahl, nachdem er sich bei seinem Austritt aus der Oeffnung in Folge der Convergenz der Flüssigkeitsfäden, aus denen er besteht, zusammengezogen hat, wieder mehr und mehr erweitert, da die Geschwindigkeit der Flüssigkeitsmoleküle, nachdem sie aus der Oeffnung getreten sind, in dem Maasse abnimmt, als sie sich erheben. Was die Vibrationen anbelangt, von denen wir gesprochen haben und welche auf die Theilung des abwärtsgehenden Strahls in Tropfen so grossen Einfluss haben, so bringen dieselben in dem aufsteigenden Strahl nur eine geringe Wirkung hervor, da der Querschnitt desselben, indem er sich vom Contractions-Querschnitt an vergrössert anstatt verkleinert, niemals klein genug ist, um die Wirkung dieser Vibrationen deutlich genug hervortreten zu lassen.

§. 339. Das, was wir bisher bezüglich der Ausflussgeschwindigkeit einer Flüssigkeit aus einer Oeffnung gesagt haben, gilt ohne Unterschied, sowohl für den Fall, wo der Ausfluss im luftleeren Raume stattfindet (wie wir eigentlich bisher stillschweigend immer vorausgesetzt haben), als in dem Fall, wo er in der atmosphärischen Luft vor sich geht. Die Ausflussgeschwindigkeit bleibt stets dieselbe, welches auch der Druck ist, der auf die freie Oberfläche der Flüssigkeit im Gefäss ausgeübt wird, vorausgesetzt, dass der Flüssigkeitsstrahl bei seinem Austritt aus der Oeffnung von aussen her den nämlichen Druck erleidet. Dagegen wird die Ausflussgeschwindigkeit sehr verschieden von der, welche wir angegeben haben, wenn die Drückungen auf gleiche Flächenstücke der freien Oberfläche der Flüssigkeit und der Oeffnung ungleich gross sind.

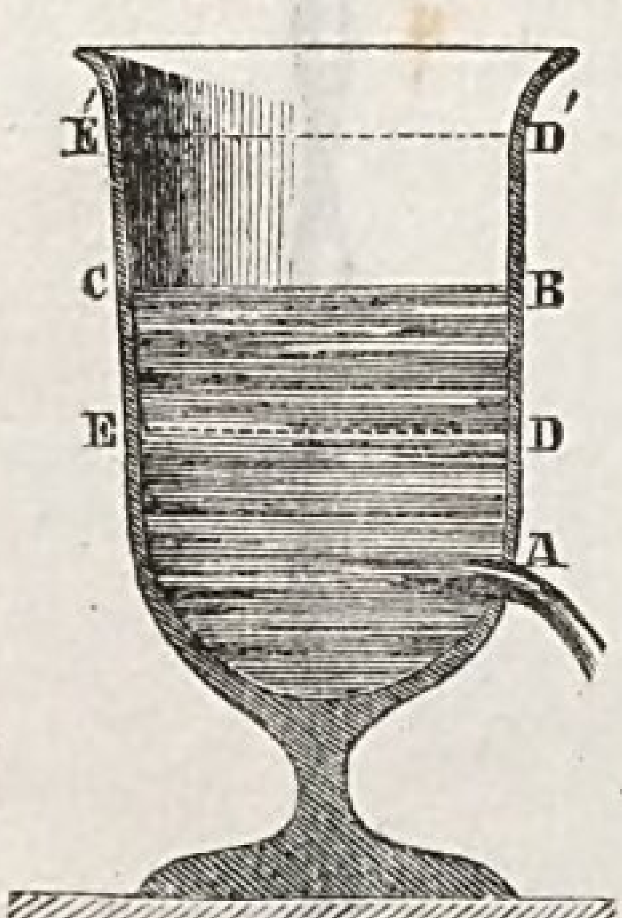


Fig. 468.

Wenn der Druck auf die Oeffnung A grösser als der auf die freie Oberfläche BC der Flüssigkeit ist (Fig. 468), so muss der Ueberschuss des ersteren über den zweiten kleiner als der Druck einer Flüssigkeitssäule sein, welche den vertikalen Abstand der Oeffnung A unter der Oberfläche BC zur Höhe hat; denn ausserdem könnte die Flüssigkeit nicht durch diese Oeffnung ausfliessen. Denken wir uns daher eine Horizontalebene DE, welche unter der Oberfläche BC in solcher Ent-

fernung von derselben durch die Flüssigkeit gelegt wurde, dass das Gewicht einer vertikalen Flüssigkeitssäule, die zwischen den beiden Ebenen steht und als Basis die Flächeneinheit hat, gleich dem Ueberschuss des Druckes ist, um welchen es sich handelt. Da die Grösse der Oeffnung, wie wir stets voraussetzen, im Verhältniss zur Weite des Gefässes nur klein ist, so ist die Bewegung der Flüssigkeit innerhalb des Gefässes eine so langsame, dass wir annehmen können, dass sich die Drückungen sehr nahezu auf dieselbe Weise fortpflanzen, als wenn die Flüssigkeit im Gleichgewicht wäre. Der Druck, welcher in irgend einem Punkt der Ebene DE ausgeübt wird, ist also gleich dem, welchen die Oberfläche BC zu tragen hat, vermehrt um die Differenz zwischen diesem letzteren Druck und demjenigen, welcher auf die Oeffnung A stattfindet; es ist also der Druck auf die Ebene DE der nämliche, wie der auf die Oeffnung A. Die unterhalb der Ebene DE gelegene Flüssigkeit ist daher unter den nämlichen Umständen, als wenn die zwischen BC und DE enthaltene Flüssigkeitsmasse weggenommen würde und die dadurch entstandene freie Oberfläche DE und die Ausflussöffnung A gleichen Drückungen ausgesetzt wären. Es wird folglich die Ausflussgeschwindigkeit noch durch die Formel $v = \sqrt{2gh}$ dargestellt, vorausgesetzt, dass man für h die Höhe der Ebene DE über der Ausflussöffnung nimmt.

Wenn der Druck auf die Oberfläche BC der Flüssigkeit grösser als der auf die Oeffnung A ist, so kann man sich vorstellen, dass der Ueberschuss des Druckes auf die Fläche BC durch eine Flüssigkeit hervorgebracht wird, die, von derselben Natur wie die im Gefäss enthaltene, in entsprechender Höhe über dieser Fläche steht und ihre freie Oberfläche etwa in D′E′ hat. Der Ausfluss findet dann ganz auf dieselbe Weise statt, als wenn die freie Oberfläche der Flüssigkeit, anstatt in BC, in D′E′ gelegen wäre, aber dafür nun denselben Druck zu erleiden hätte, wie er auf die Ausflussöffnung ausgeübt wird. Die Formel $v = \sqrt{2gh}$ gibt also auch hier wieder die Ausflussgeschwindigkeit, vorausgesetzt, dass h den vertikalen Abstand der Oeffnung unter der Ebene D′E′ bezeichnet.

In dem gewöhnlich vorkommenden Falle, wo das Gefäss in freier Luft steht und der Ausfluss gleichfalls in diese stattfindet, kann der Druck auf die Oberfläche der Flüssigkeit und auf die Oeffnung als gleich, nämlich gleich dem der atmosphärischen Luft, betrachtet werden. Wenn aber der Druck auf die freie

Oberfläche stärker oder schwächer als der der atmosphärischen Luft ist, oder wenn die Flüssigkeit aus der Oeffnung in einen allseitig geschlossenen Raum fliesst, in welchem die Luft verdichtet oder verdünnt wurde, oder der gar luftleer ist, so hat man die Verschiedenheit des Druckes auf die freie Oberfläche und auf die Oeffnung in der Weise in Rechnung zu ziehen, wie es soeben gezeigt wurde. Manchmal kommt es auch vor, dass der Ausfluss, anstatt in die Luft oder in den luftleeren Raum, in eine Flüssigkeit stattfindet, die aber dann gewöhnlich von derselben Natur ist wie die ausfliessende; dies ist z. B. der Fall, wenn das Gefäss, aus welchem der Ausfluss geschieht, in einem zweiten so steht, dass sich seine Ausflussmündung unter der Oberfläche der Flüssigkeit in diesem Gefäss befindet (Fig. 469).

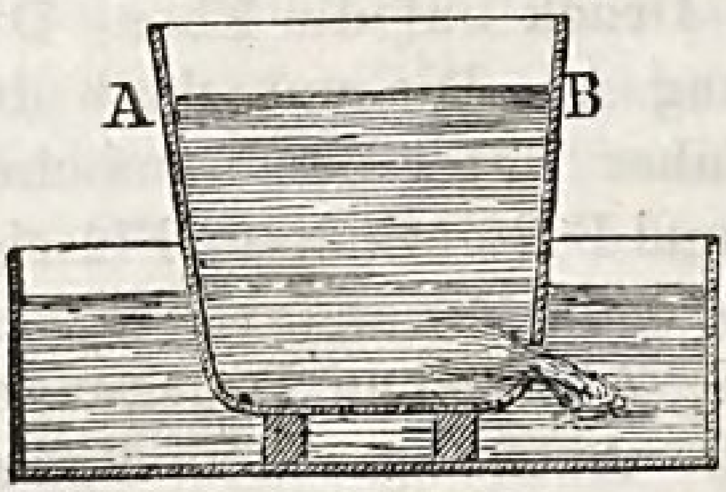
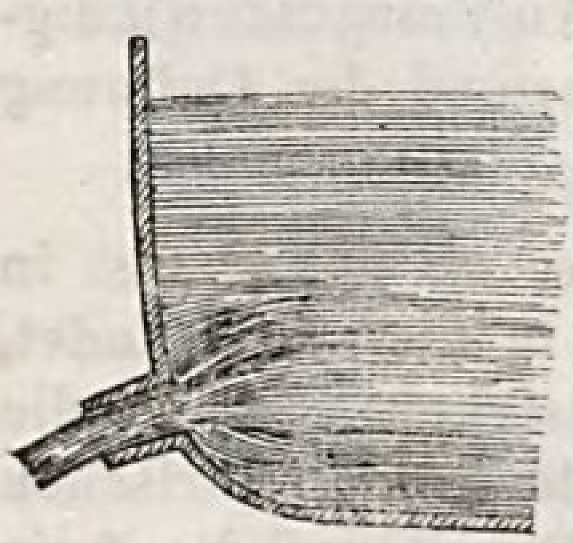


Fig. 469.

Auch in diesem Falle erhält man die Ausflussgeschwindigkeit noch aus der Formel $v = \sqrt{2gh}$, nur hat man nun, wie leicht zu sehen, statt der Druckhöhe h die Höhendifferenz der beiden Spiegel AB und CD im inneren und äusseren Gefäss zu setzen.

§. 340. Einfluss der Ansatzröhrchen auf die Ausflussmenge. — Wenn man an der Oeffnung, durch welche eine Flüssigkeit ausfliessen soll, ein kurzes Röhrenstückchen von cylindrischer oder konischer Form anbringt, so wird durch dieses Röhrchen, welches man kurz Ansatzröhrchen nennt, der Ausfluss in sehr merklicher Weise modificirt. In dem Fall, wo die Oeffnung eine Wand durchdringt, welche eine gewisse Dicke hat, befindet sich dieselbe natürlich unter den nämlichen Umständen, als wenn sie in einer dünnen Wand angebracht und mit einem Ansatzröhrchen versehen wäre, dessen Länge gleich der Dicke der ersteren Wand ist. Die Dicke der Wand, in welcher sich die Oeffnung befindet, hat also denselben Einfluss auf das Ausfliessen der Flüssigkeit wie ein Ansatzröhrchen, und aus diesem Grunde haben wir bisher vorausgesetzt, dass die Ausflussöffnung in einer sehr dünnen Wand angebracht sei.


Fig. 470.

Wenn das Ansatzröhrchen cylindrisch ist (Fig. 470), so kann der Ausfluss auf zwei verschiedene Arten stattfinden: entweder werden die Wände des Ansatzröhrchens von der durchströmenden Flüssigkeit gar

nicht berührt, oder sie werden von dieser Flüssigkeit benetzt. In dem ersten Fall ist der Vorgang genau so, als wenn die Oeffnung in einer dünnen Wand gemacht wäre; der Strahl zieht sich anfangs zusammen, um hierauf eine nahezu cylindrische Form anzunehmen; er erfüllt nicht den ganzen inneren Raum des Röhrchens und dieses könnte daher auch abgenommen werden, ohne dass im Geringsten dadurch etwas an dem Ausflusse geändert würde. In dem zweiten Fall, der gewöhnlich stattfindet, erhält der Flüssigkeitsstrahl eine ganz verschiedene Form von derjenigen, welche er ohne Ansatzröhrchen annehmen würde; die Adhäsion der Flüssigkeit an den Wänden des Röhrchens zwingt den Strahl, den ganzen inneren Raum des Ansatzröhrchens auszufüllen: dieser Strahl nimmt also, anstatt sich zusammenzuziehen, wie er es thun würde, wenn die Oeffnung in einer dünnen Wand angebracht wäre, sogleich die Form eines Cylinders an, der zur Basis die Ausflussöffnung selbst hat.

Wenn man die Flüssigkeitsmenge misst, welche sich während einer Secunde durch ein Ansatzröhrchen, dessen Wände von der Flüssigkeit benetzt werden, ergiesst, so findet man, dass die Ausflussmenge durch die Wirkung des Ansatzröhrchens bedeutend vermehrt wird; sie ist nun ungefähr 0,82 der theoretischen Ausflussmenge (§. 337), während sie, wenn der Ausfluss durch eine Oeffnung in einer dünnen Wand stattfindet, nur 0,62 jener Ausflussmenge ist. Die Ursache dieser Vergrösserung der Ausflussmenge ist nicht schwer einzusehen. Wir haben gesehen, dass in dem Fall, wo der Ausfluss durch eine Oeffnung in dünner Wand stattfindet, die wirkliche Ausflussmenge hauptsächlich desshalb so weit unter der theoretischen bleibt, weil sich der Flüssigkeitsstrahl zusammenzieht und in Folge dessen sein Querschnitt nach der Contraction bedeutend kleiner als derjenige der Oeffnung ist, welche er durchdringt. Indem also das Ansatzröhrchen die Contraction des Strahls verhindert, ist es ganz natürlich, dass durch seine Gegenwart eine Vermehrung der Ausflussmenge hervorgebracht wird. Die Ursache, in Folge deren wir oben die Ausflussmenge theoretisch zu gross gefunden haben (§. 337), verschwindet hier vollständig. Aber wenn dies der Fall ist, so fragt man mit Recht, warum im Falle eines Ansatzröhrchens die wirkliche Ausflussmenge der theoretischen nicht vollständig gleich, sondern nur 0,82 derselben ist. Der Grund davon liegt darin, dass durch den Einfluss des Ansatzröhrchens nicht blos der Querschnitt des Strahls modificirt und dem der Ausflussöffnung gleich gemacht wird, sondern dass dasselbe zu gleicher

Zeit, und zwar verzögernd, auf die **Geschwindigkeit** der ausfliessenden Flüssigkeit einwirkt; diese Geschwindigkeit ist in Wirklichkeit kleiner als sie durch die Formel $v = \sqrt{2gh}$ geliefert wird. Um aber das, was wir die theoretische Ausflussmenge genannt haben, zu erhalten, haben wir die Menge der in einer Secunde ausfliessenden Flüssigkeit als einen Cylinder betrachtet, der zur Basis die Oeffnung selbst und zur Höhe die Geschwindigkeit $\sqrt{2gh}$ hat. Wir haben gesehen, dass das auf diese Art erhaltene Resultat in dem Falle, wo der Ausfluss durch eine Oeffnung in dünner Wand geschieht, hauptsächlich desshalb ungenau ist, weil man für die Basis jenes Flüssigkeitscylinders den Contractions-Querschnitt des Strahls und nicht den der Oeffnung nehmen muss. Die Wirkung des Ansatzröhrchens macht die Basis des Flüssigkeitscylinders der Oeffnung wieder gleich, aber sie vermindert zu gleicher Zeit die Höhe dieses Cylinders. Indessen wird die Höhe des Flüssigkeitscylinders nicht in dem Verhältniss vermindert, in welchem die Basis desselben vergrössert wird, und im Ganzen wird durch das Ansatzröhrchen also doch eine Vermehrung der Ausflussmenge zu Stande gebracht.

Wir haben nun die Ursache der durch cylindrische Ansatzröhrchen hervorgebrachten Verminderung der Ausflussgeschwindigkeit der Flüssigkeit anzugeben. Diese Verminderung entspringt nämlich nicht blos aus den Hindernissen, welche sich der Bewegung der Flüssigkeitsmoleküle in Folge ihrer Reibung an den Röhrenwänden, sowie in Folge der stets vorhandenen, wenn auch meist nur äusserst geringen Klebrigkeit der Flüssigkeit selbst entgegensetzen, sondern bei weitem zum grössten Theil aus einem anderen Umstande, den wir eben jetzt erörtern wollen. Wir haben gesagt, dass die Contraction, welche ein Flüssigkeitsstrahl bei seinem Austritt aus einer Oeffnung in dünner Wand erleidet, von der Convergenz der Flüssigkeitsfäden herrührt, welche dieselben in dem Augenblick besitzen, wo sie in die Oeffnung treten, und die sie erst in gewisser Entfernung von dieser Oeffnung vollständig verlieren. Indem das cylindrische Ansatzröhrchen die Contraction des Strahls verhindert, nöthigt es die Flüssigkeitsfäden, in dem Augenblick, wo sie durch die Oeffnung hindurch gehen, plötzlich ihre Richtung zu wechseln. Diese Fäden befinden sich also unter denselben Umständen, als wenn sie einen Stoss erführen, der so auf sie ausgeübt wird, dass er eben jenen plötzlichen Wechsel der Richtung hervorbringt. Nun haben wir gesehen (§. 184), dass Stösse im Allgemeinen einen Verlust an Arbeit hervorrufen. Die Flüssigkeitsmoleküle können also in dem

Augenblick, wo sie das Ansatzröhrchen durchlaufen, nicht die ganze Geschwindigkeit mehr haben, die sie ohne diesen Umstand besitzen würden; sie müssen sich so bewegen, als wenn sie, bei abgenommenem Ansatzröhrchen, eine geringere Höhe herabgefallen wären. Dass diese Erklärung richtig ist, zeigt der Umstand, dass, wenn man dem Ansatzröhrchen die Gestalt des contrahirten Strahls gibt, wie es Fig. 471 zeigt, sodass eine plötzliche Richtungsänderung der Flüssigkeitsfäden nicht mehr stattfindet, die wirkliche Ausflussmenge auf 96 bis 98 Procent der theoretischen erhöht wird. Der Unterschied, welcher zwischen der durch diese Zahlen angegebenen wirklichen Ausflussmenge und der theoretischen noch besteht, rührt offenbar von den bereits oben erwähnten Hindernissen, welche sich der Bewegung der Flüssigkeitsmoleküle durch das Röhrchen entgegensetzen, her.

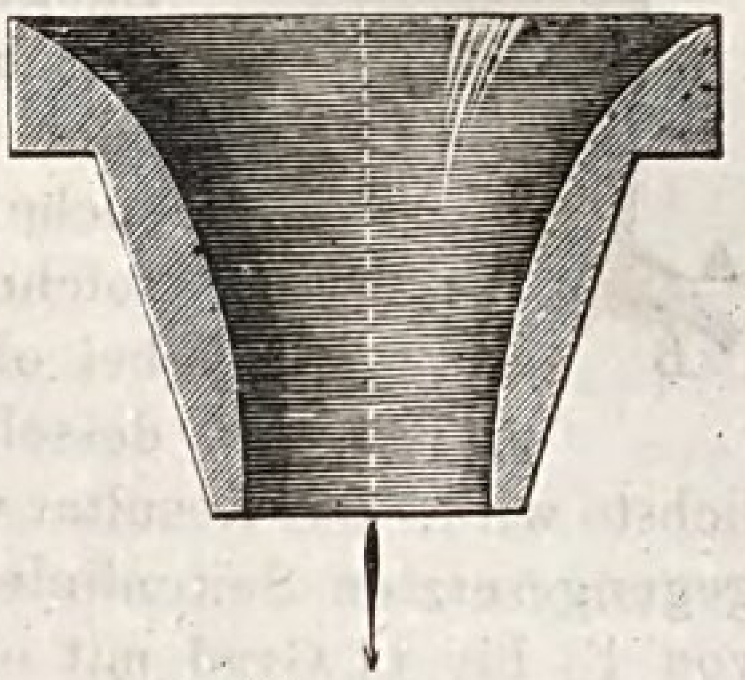


Fig. 471.

Der plötzliche Wechsel, welchen die Flüssigkeitsfäden in dem Moment, wo sie in dem Ansatzröhrchen ankommen, erfahren, kommt nicht zu Stande, ohne dass die Flüssigkeit eine Gegenwirkung auf die Wände dieses Ansatzröhrchens äussert. Diese Reaction, eine Art von Centrifugalkraft, veranlasst eine Verminderung des Druckes, welchen die Flüssigkeit gegen diese Wände ausübt; der Druck, welcher in dem Ansatzröhrchen nahe bei seiner Einmündung AB (Fig. 472) stattfindet, ist folglich kleiner als der der atmosphärischen Luft. Dies sieht man leicht, wenn man oben an dem Ansatzröhrchen eine Glasröhre C anbringt, welche sich bald abwärts krümmt und in ein Gefäss mit Quecksilber taucht. Während des Ausflusses der Flüssigkeit sieht man das Quecksilber in dieser Röhre steigen und sich in bestimmter Höhe über dem äusseren Niveau halten. In Folge des Durchgangs der Flüssigkeit durch das Ansatzröhrchen wird also eine Art von Saugen an den Wänden dieses Röhrchens hervorgebracht und dadurch das Quecksilber in der Röhre C gehoben.

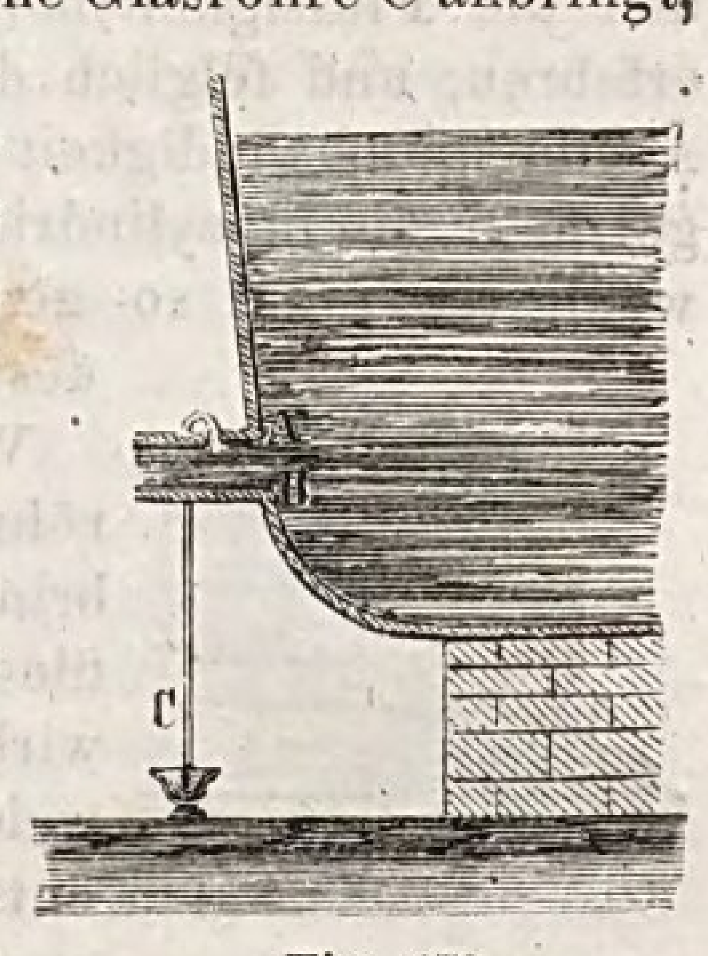


Fig. 472.

§. **341.** Die Einsicht, welche wir durch das Vorhergehende in die Wirkungsweise

cylindrischer Ansatzröhrchen erhalten haben, führt uns nun auch zum leichteren Verständniss des Vorgangs, welcher stattfindet, wenn die Flüssigkeit durch Ansatzröhrchen von verschiedener Form ausfliesst.

Ein konisches convergentes Ansatzröhrchen (Fig. 473) hat einen mehr oder weniger grossen Einfluss auf das Ausfliessen der Flüssigkeit, je nachdem bei der nämlichen Länge des Röhrchens der Unterschied der Durchmesser seiner beiden Grundflächen mehr oder weniger gross ist. Man hat durch Versuche festzustellen gesucht, welche Form ein solches Ansatzröhrchen erhalten muss, damit bei einer gleichbleibenden Ausmündung A B desselben die Ausflussmenge die grösstmöglichste wird. Das Resultat war, dass in diesem Fall die beiden entgegengesetzten Seitenlinien A C und B D des Kegels einen Winkel von 13 bis 14 Grad mit einander bilden müssen; in diesem Verhältniss wurde die Fig. 473 construirt. Bei Anwendung eines solchen Ansatzröhrchens erhält man eine wirkliche Ausflussmenge, welche 0,95 der theoretischen ist, vorausgesetzt natürlich, dass der letzteren die Ausmündung A B zu Grunde gelegt wird. Für einen grösseren Winkel sowohl wie für einen kleineren wird die Ausflussmenge geringer. Es ist leicht, sich über dieses Resultat Rechenschaft zu geben: Erstens ist die Contraction des Flüssigkeitsstrahls bei seinem Austritt aus der Oeffnung A B um so geringer, je weniger die Flüssigkeitsfäden gegen einander convergiren, je mehr sich also die Gestalt des Ansatzröhrchens der cylindrischen nähert; zweitens dagegen ist der plötzliche Wechsel, den die Flüssigkeitsfäden bei ihrem Eintritt in das Röhrchen erfahren, und folglich die dadurch veranlasste Verminderung der Ausflussgeschwindigkeit in konischen Ansatzröhrchen nothwendig geringer als in cylindrischen und, bis zu einer gewissen Grenze wenigstens, um so geringer, je grösser der Convergenzwinkel des ersteren ist.

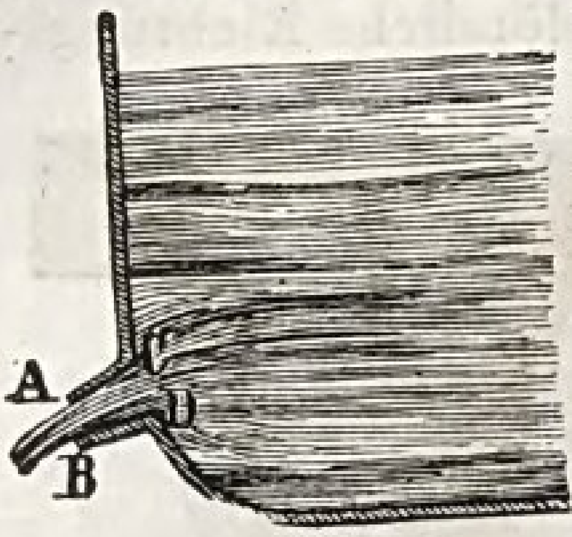


Fig. 473.

Wenn man ein konisches divergentes Ansatzröhrchen an einer Oeffnung A B (Fig. 474) anbringt und seine Wände werden von der ausfliessenden Flüssigkeit benetzt, so kommt die wirkliche Ausflussmenge der theoretischen, welche der Einmündung AB in das Röhrchen entspricht, bedeutend näher, ja sie kann diese sogar noch übertreffen. Wenn man aber der

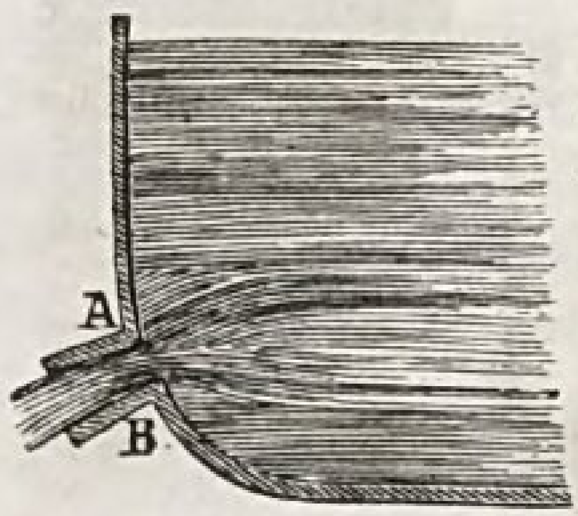


Fig. 474.

theoretischen Ausflussmenge den grösseren Querschnitt der Ausmündung des Röhrchens zu Grunde legt, so bleibt die wirkliche Ausflussmenge weit hinter der theoretischen zurück, weiter als in all' den Fällen, die wir bisher gehabt haben. Es wird folglich die Ausflussgeschwindigkeit der Flüssigkeit an der Ausmündung des Röhrchens in Folge der Divergenz des letzteren verkleinert, und wenn man bedenkt, dass in diesem Falle die Aenderung in der Richtung der Flüssigkeitsfäden, welche das Röhrchen durchströmen, viel bedeutender ist als in den früheren Fällen, so hat diese Verminderung der Geschwindigkeit durchaus nichts Befremdendes. In dem Maasse aber als die Flüssigkeit das divergente Röhrchen von seiner Einmündung bis zu seiner Ausmündung durchströmt, muss sie durch immer grössere und grössere Querschnitte hindurchfliessen; ihre Geschwindigkeit muss sich also, wie man leicht sieht, mehr und mehr verkleinern. Der Querschnitt an der Einmündung des Röhrchens wird also mit grösserer Geschwindigkeit durchströmt, als der an seiner Ausmündung: die Erweiterung des Röhrchens nach aussen bringt so zu sagen eine Art von Saugen an der Oeffnung AB hervor. Es ist nun leicht denkbar, dass die durch die plötzlichen Richtungsänderungen der Flüssigkeitsfäden hervorgebrachte Verminderung der Ausflussgeschwindigkeit von der Vermehrung derselben, welche an der Oeffnung AB stattfindet, mehr als aufgewogen wird, und dass diese letztere Vermehrung sogar so gross werden kann, dass die wirkliche Ausflussmenge die theoretische (für diese letztere die Einmündung AB zu Grunde gelegt) übertrifft.

Für ein 9 Centimeter langes konisches Röhrchen, das an der Einmündung 2,468 und an der Ausmündung 3,228 Centimeter weit war, dessen Convergenzwinkel also $4^0\ 50'$ betrug, erhielt man für den Ausfluss-Coëfficienten 0,553, wenn die weitere 0,946 dagegen wenn die engere Mündung bei der theoretischen Ausflussmenge zu Grunde gelegt wurde. *Eytelwein* experimentirte mit einem divergenten Röhrchen, das an seiner Einmündung G die Form des contrahirten Strahls hatte (Fig. 475) und welches an seinem kleinsten Querschnitt K $2^{cm},616$, an seinem grössten L $4^{cm},686$ weit war; die Länge desselben betrug $23^{cm},05$, sein Convergenzwinkel also $5^0\ 9'$. *Eytelwein* fand für den Ausfluss-Coëfficienten 0,483, wenn er die weitere, und 1,553, wenn er die engere Mündung der theoretischen Ausflussmenge zu Grunde legte. Bei kleineren Ausflussgeschwindigkeiten und bei grösserer Divergenz ist es übrigens bald nicht mehr möglich, selbst durch vorhergegangenes Zuhalten der Röhrchen den vollen Ausfluss herbeizuführen.

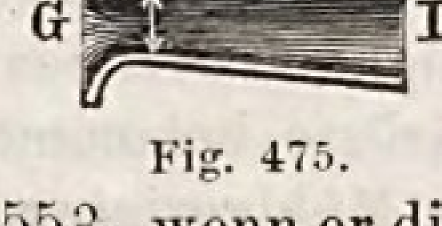


Fig. 475.

§. 342. Wenn man die Geschwindigkeit, mit welcher eine Flüssigkeit aus einer Oeffnung fliesst, dazu benützen will, um eine gewisse Wirkung damit zu erzielen, um z. B. ein Wasserrad damit zu bewegen, so ist es wichtig, alle Geschwindigkeitsverluste, welche die plötzlichen Aenderungen in der Richtung der Flüssigkeitsfäden stets begleiten, so viel als möglich zu vermeiden. Wenn man die Oeffnung in einer Wand ohne Dicke anbringen könnte, so wären diese Verluste gar nicht vorhanden. Aber die Wand muss nothwendig eine gewisse Dicke haben, damit sie dem Drucke, welchen sie zu erleiden hat, widerstehen kann; die Oeffnung, welche man darin anbringt, befindet sich also unter denselben Bedingungen wie eine Oeffnung in dünner Wand, welche mit einem Ansatzröhrchen versehen ist. Um daher die Geschwindigkeitsverluste, welche aus dem Durchgang der Flüssigkeit durch diese Oeffnung entspringen, möglichst zu vermeiden, rundet man die Ränder der Oeffnung gegen das Innere des Gefässes hin ab (Fig. 476), am besten in der Form des contrahirten Strahls. Auf diese Art ändern die Flüssigkeitsfäden nur allmählich ihre Richtung und treten daher aus der Oeffnung sehr nahezu mit der ganzen Geschwindigkeit, welche durch die Höhe der freien Oberfläche über der Oeffnung bestimmt wird.

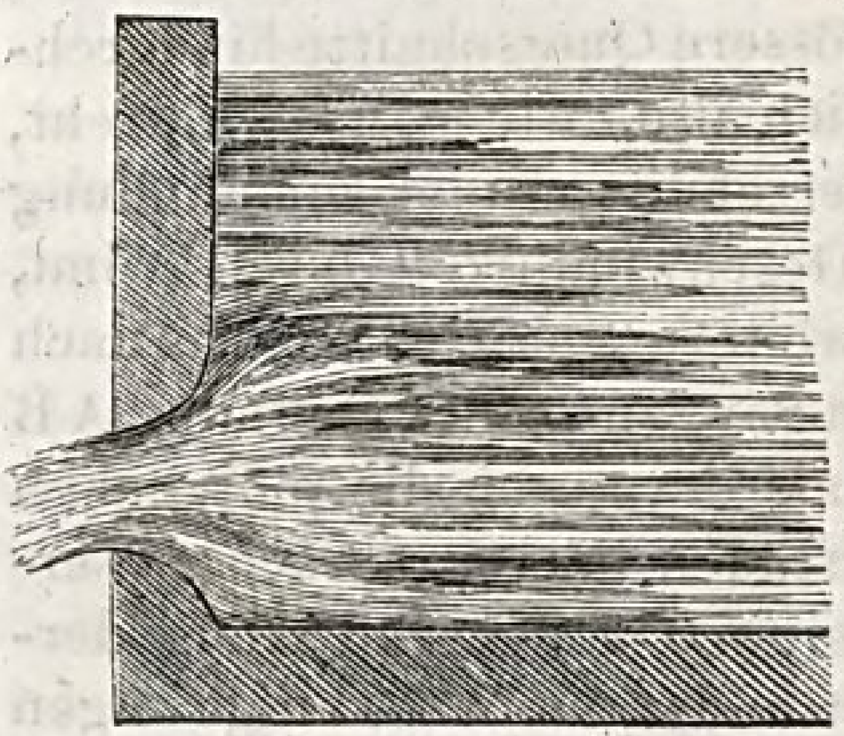


Fig. 476.

§. 343. **Ausfluss einer Flüssigkeit durch eine grössere Oeffnung in einer Seitenwand.** — Wir haben bisher vorausgesetzt, dass die Oeffnung, durch welche der Ausfluss stattfindet, gegen den von der Flüssigkeit bespülten Theil der Wand, in welcher sie angebracht ist, nur klein sei und in einer, im Verhältniss zu ihrer Grösse beträchtlichen Entfernung unter dem Spiegel im Gefäss liege, im Falle sie eine Seitenwand durchdringt. Unter diesen Vorraussetzungen konnten wir unbedenklich annehmen, dass die sämmtlichen Flüssigkeitsmoleküle, welche zu gleicher Zeit durch die Oeffnung fliessen, einerlei Geschwindigkeit besitzen. Wenn aber die Oeffnung eine beträchtliche Grösse bekommt, wie dies in den Anwendungen bei den Schützen in Mühlgerinnen, bei Schleusen etc. so häufig der Fall ist, und es ist diese Oeffnung in einer vertikalen oder schiefen Seitenwand angebracht, so sind die Druckhöhen, welche verschieden hoch gelegenen Stellen der Oeffnung entsprechen, nicht gleich gross. Die Folge davon ist, dass die Moleküle an diesen verschiedenen Stellen mit ungleicher

Geschwindigkeit durch die Oeffnung strömen, die unteren schneller, die oberen langsamer. Man versteht nichtsdestoweniger auch hier wieder unter der theoretischen Ausflussmenge die Zahl, welche man erhält, wenn man den Querschnitt der Oeffnung mit der aus der Formel $v = \sqrt{2gh}$ folgenden Geschwindigkeit multiplicirt, unter h den vertikalen Abstand des Mittelpunkts der Oeffnung unter der freien Oberfläche im Gefäss verstanden. Dabei setzen wir stillschweigend voraus, dass die Oeffnung einen Mittelpunkt habe, und dies ist in der Praxis, wo man fast ausschliesslich rechteckige oder kreisrunde Oeffnungen anwendet, in der That beinahe immer der Fall. Die so erhaltene theoretische Ausflussmenge muss aber wieder mit einem Coëfficienten, dem sog. Ausfluss-Coëfficienten, multiplicirt werden, um die wirkliche Ausflussmenge zu erhalten. Die Grösse dieses Coëfficienten hängt aber wesentlich von den Umständen ab, unter denen der Ausfluss stattfindet.

Wenn die oberste Kante der Oeffnung noch unter dem Spiegel der Flüssigkeit im Gefäss liegt, und wenn diese Oeffnung wenigstens $1\frac{1}{2}$ bis 2mal so weit, als ihre kleinste Dimension beträgt, vom Boden und den Seitenwänden des Reservoirs entfernt ist, so strömen die Flüssigkeitsfäden von allen Seiten gegen sie, und die Zusammenziehung des Strahls findet von allen Seiten her statt. Man sagt dann, die Contraction sei vollständig. Die genauesten Versuche über den Ausfluss des Wassers dieser Art durch grössere rechteckige Seitenmündungen sind in Metz von *Poncelet* und *Lesbros* angestellt worden. Die Breiten dieser Mündungen waren 2 und in einigen Fällen 6 Decimeter, die Höhen derselben aber sehr verschieden, von 1 Centimeter bis 2 Decimeter. Um eine vollständige Contraction herbeizuführen wurden zur Herstellung dieser Mündungen dünne, blos 4 Millimeter starke Messingbleche verwendet. Die folgenden beiden Tabellen enthalten die Resultate, welche aus diesen Versuchen für den Ausfluss-Coëfficienten erhalten wurden. Dabei ist zu bemerken, dass sich bei solchen grösseren Oeffnungen der Flüssigkeitsspiegel unmittelbar über der Oeffnung stets etwas senkt. Wenn man daher die Druckhöhe an der vertikalen Gefässwand selbst, in welcher die Ausflussöffnung angebracht ist, misst, so erhält man sie etwas kleiner als an einer weiter von dieser Wand entfernten Stelle, wo das Wasser vollkommen ruhig steht. Die erste der beiden folgenden Tabellen gibt den Ausfluss-Coëfficienten für den Fall, dass die angegebenen Wasserstände an einer Stelle, wo das Wasser ruhig steht, gemessen werden; in der zweiten Tabelle wird vorausgesetzt, dass man die Wasserstände unmittelbar über der Oeffnung nimmt.

Tab. 17. Ausfluss-Coëfficienten von Poncelet und Lesbros.

Abstand des Wasserspiegels von der oberen Kante der Mündung.	Ausfluss-Coëfficienten							
	für die Breite der Oeffnung = 0m,2 und für die Höhen derselben von						für die Breite der Oeffnung = 0m,6 und die Höhen:	
	0m,20	0m,10	0m,05	0m,03	0m02	0m,01	0m,20	0m,02
0m,02	0,572	0,596	0,615	0,634	0,659	0,694	—	0,643
0,04	0,582	0,603	0,623	0,640	0,658	0,683	0,595	0,642
0,08	0,589	0,610	0,629	0,638	0,656	0,670	0,601	0,640
0,15	0,595	0,613	0,630	0,635	0,651	0,659	0,604	0,637
0,25	0,599	0,616	0,630	0,632	0,646	0,653	0,606	0,634
0,50	0,603	0,617	0,628	0,630	0,640	0,644	0,607	0,630
1,00	0,605	0,615	0,626	0,628	0,633	0,632	0,605	0.626
1,50	0,602	0,611	0,620	0,620	0,619	0,615	0,602	0,623
2,00	0,601	0,607	0,613	0,612	0,612	0,611	0,602	0,620
3,00	0,601	0,603	0,606	0,608	0,610	0,609	0,601	0,615

Tab. 18. Ausfluss-Coëfficienten von Poncelet und Lesbros.

Abstand des Wasserspiegels von der oberen Kante der Mündung.	Ausfluss-Coëfficienten						
	für die Breite der Oeffnung = 0m,2 und die Höhe von						für die Breite der Oeffnung von 0m,6 und die Höhe von
	0m,20	0m,10	0m,05	0m,03	0m,02	0m,01	0m,20
0m,02	0,594	0,614	0,638	0,668	0,697	0,729	0,591
0,04	0,593	0,612	0,636	0,654	0,678	0,695	0,594
0,08	0,594	0,613	0,635	0,643	0,662	0,675	0,598
0,15	0,597	0,615	0,632	0,636	0,652	0,660	0,602
0,25	0,600	0,616	0,630	0,632	0,646	0,653	0,604
0,50	0,603	0,617	0,628	0,630	0,640	0,645	0,607
1,00	0,605	0,615	0,626	0,628	0,633	0,632	0,606
1,50	0,602	0,611	0,620	0,620	0,619	0,615	0,603
2,00	0,601	0,607	0,614	0,612	0,612	0,611	0,602
3,00	0,601	0,603	0,606	0,608	0,610	0,609	0,601

Beispiel: Wie gross ist die Ausflussmenge einer 2 Decimeter breiten und 5 Centimeter hohen rechteckigen Oeffnung, deren oberste Kante 5 Decimeter unter der Oberfläche des Wassers

im Gefäss liegt, diese Höhe an einer von der Wand entfernten Stelle, wo das Wasser ruhig steht, gemessen? — Die Entfernung des Mittelpunktes der Oeffnung vom Spiegel ist hier $0^m,525$ und folglich die theoretische Ausflussmenge $0{,}2 \times 0{,}05 \, . \sqrt{2g \, . \, 0{,}525}$ $= 0{,}0321$ Cubikmeter. Die erste Tabelle ergibt für den Ausflusscoëfficienten 0,628; folglich ist die wirkliche Ausflussmenge $0{,}628 \times 0{,}0321 = 0{,}0202$ Cubikmeter.

Die obigen Tabellen zeigen, dass bei derselben Höhe der Oeffnung der Ausflusscoëfficient nur wenig von der Breite derselben abhängt. Für andere Breiten als die in den Tabellen angegebenen kann man daher, ohne grossen Fehler, ebenfalls noch die in diesen Tafeln aufgeführten Ausflusscoëfficienten benützen. Für eine grössere Höhe der Oeffnung als $0^m,20$ nimmt man den für diese Höhe angegebenen Coëfficienten.

§. 344. Wenn eine der Seiten der als reckteckig vorausgesetzten Oeffnung in einer Seitenwand oder in der Bodenfläche des Reservoirs selbst liegt, sodass die Wasserfäden parallel mit dieser Wand austreten müssen (Fig. 477), so ist die Contraction für diese Seite des Strahls vermindert oder ganz aufgehoben und findet nur noch an den drei anderen Seiten statt. Man nennt dann die Zusammenziehung eine *unvollständige*. Dasselbe kann zu gleicher Zeit an den andern Seiten der Fall sein. Um den Ausflusscoëfficienten für diese Fälle zu erhalten, entnehme man den auf den vorgelegten Fall passenden aus einer der Tabellen des vorigen Paragraphen und multiplicire denselben mit

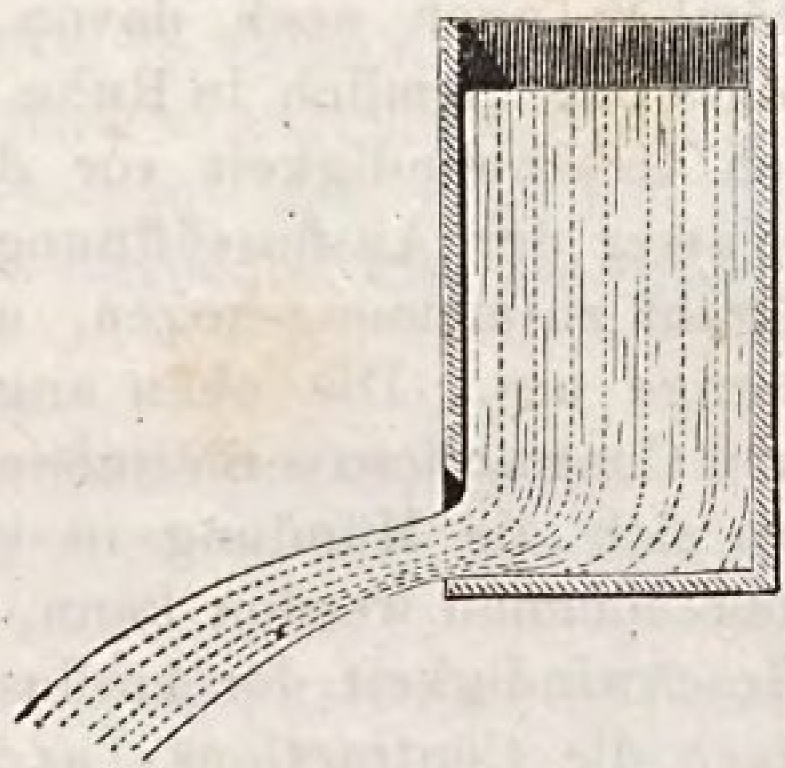


Fig. 477.

1,035, wenn die Contraction blos auf 3 Seiten stattfindet,
1,072 „ „ „ „ „ 2 „ „
1,125 „ „ „ „ „ 1 „ „

Bei senkrechten Schützen, namentlich bei solchen, welche in Schleusenthoren angebracht sind, fliesst das Wasser gewöhnlich über eine nahe dem Boden angebrachte Schwelle A (Fig. 478). Für diesen Fall kann der Ausflusscoëfficient gleich 0,625 angenommen werden. Sind mehrere solche Oeffnungen, die nahe bei einander sind, zu gleicher Zeit offen, wie es bei den Thoren einer Schleusen-

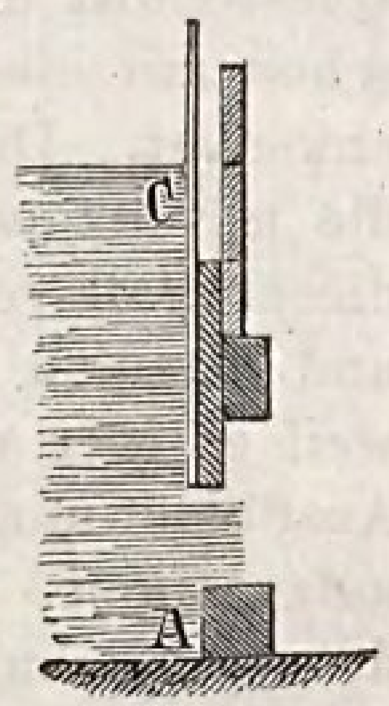


Fig. 478.

kammer der Fall ist, so wird der Ausflusscoëfficient kleiner und gleich 0,55. Diese Verminderung ist bei grossen Schleusenöffnungen noch zu bemerken, selbst wenn sie 2 bis 3 Meter von einander entfernt liegen. — Bei geneigten Schützen, wo der Boden des Behälters oder Kanals, die beiden Seiten der Schützenöffnung und theilweise die geneigten Schützen selbst die Ausflussmündung bilden, steigt der Ausflusscoëfficient auf 0,74, wenn, wie in Fig. 479, die Schütze eine schiefe Ebene bildet, deren Grundlinie AB gleich der halben Höhe BC ist, und auf 0,80, wenn AB gleich BC, wie in Fig. 480.

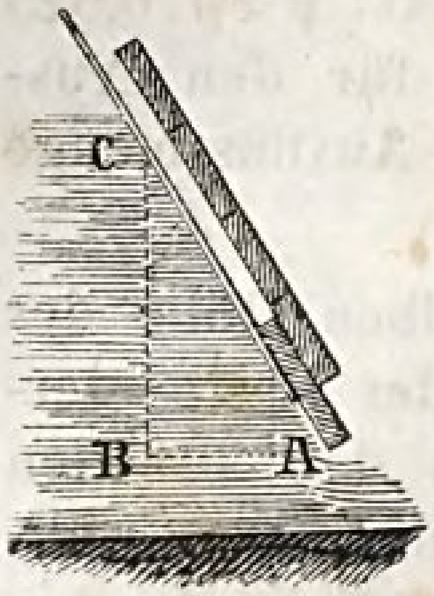


Fig. 479.

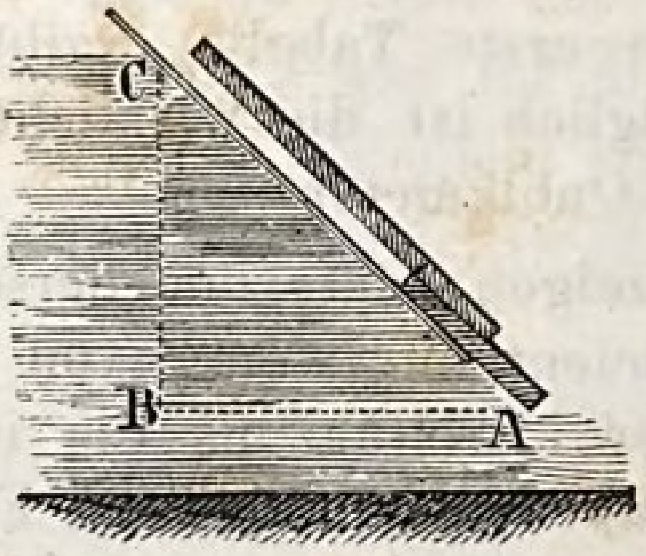


Fig. 480.

§. 345. Ausser der im vorigen Paragraphen behandelten unvollständigen kommt auch noch die sog. unvollkommene Contraction vor.*) Die Contraction des Wasserstrahls ist nämlich auch noch davon abhängig, ob das Wasser vor der Mündung ziemlich in Ruhe steht, oder ob es mit einer bestimmten Geschwindigkeit vor derselben ankommt; je schneller das Wasser der Ausflussöffnung zuströmt, je weniger ist auch der Strahl zusammengezogen, und desto grösser fällt die Ausflussmenge aus. Die oben angegebenen und untersuchten Ausfluss- und Contractionsverhältnisse beziehen sich auch nur auf den Fall, wo sich die Mündung in einer grossen Wand befindet, sodass angenommen werden kann, dass das Wasser nur mit sehr kleiner Geschwindigkeit der Ausflussöffnung zuströmt; wir müssen daher auch die Contractions- und Ausflussverhältnisse kennen lernen, wenn der Mündungsquerschnitt nicht viel kleiner ist, als der Querschnitt des zufliessenden Wassers, wenn folglich das Wasser schon mit einer beträchtlichen Geschwindigkeit an der Mündung ankommt. Dieser Fall ist es nun, in welchem, wie man sagt, die unvollkommene Contraction stattfindet. Am häufigsten kommt dieser Fall vor, wenn es darauf abgesehen ist, das in Gerinnen und Kanälen fliessende Wasser zu messen (vgl. unten §. 371), weil es hier nur selten möglich ist, das Wasser durch eine, die Ausflussöffnung enthaltende Querwand BC (Fig. 481) so hoch aufzustauen, dass die Mündung F nur ein kleiner Theil gegen den Querschnitt des zufliessenden Wasserstroms wird.

*) *Weisbach*, Ingenieur- und Maschinen-Mechanik I, Seite 721.

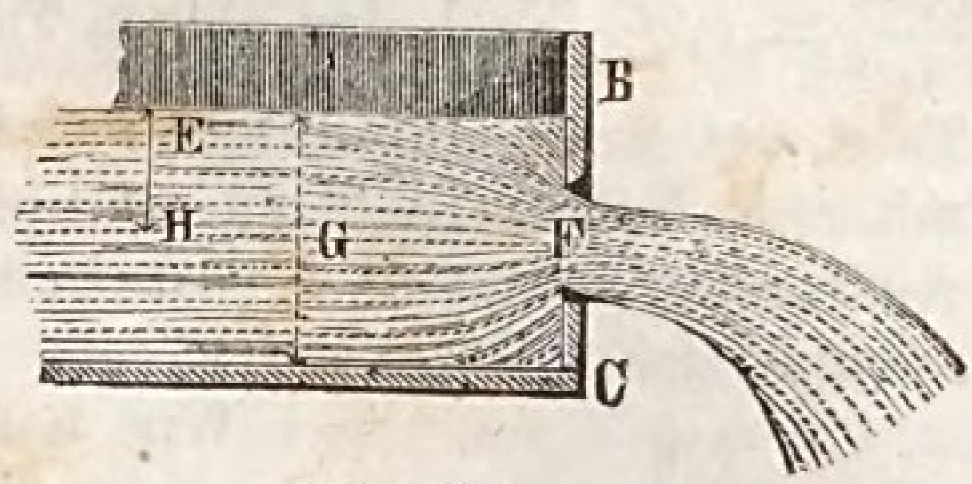


Fig. 481.

Man nennt nun auch hier wieder die theoretische Ausflussmenge die Zahl, welche man durch Multiplication des Oeffnungsquerschnitts mit der aus $\sqrt{2gh}$ folgenden Geschwindigkeit erhält, unter h wieder die Entfernung EH des Mittelpunkts der Oeffnung von dem Spiegel des zufliessenden Wassers verstanden. Diese theoretische Ausflussmenge ist mit einem Ausflusscoëfficienten zu multipliciren, um die wirkliche Ausflussmenge zu erhalten. Der Ausflusscoëfficient wird aber von der Grösse der Contraction abhängen, und diese selbst ist, wie wir oben schon sagten, durch die Geschwindigkeit des zufliessenden Wassers bedingt. Diese letztere steht aber zu der Geschwindigkeit, mit welcher das Wasser aus der Oeffnung strömt, in demselben Verhältniss wie der Querschnitt F dieser Oeffnung zu dem Querschnitt G des zufliessenden Wassers; es wird folglich der Ausflusscoëfficient auf's Innigste mit dem Verhältniss der Querschnitte F und G zusammenhängen. Nach *Weisbach* wird er erhalten, wenn man dem für die gegebene Mündung passenden Ausflusscoëfficienten aus einer der Tabellen des §. 343 entnimmt und denselben mit einem Factor multiplicirt, der aus der folgenden kleinen Tabelle zu entnehmen ist.

Tab. 19. Factoren für die Ausfluss-Coëfficienten.

Verhältniss des Querschnitts F der Oeffnung zum Querschnitt G des zufliessenden Wassers.	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
Factor:	1,002	1,006	1,014	1,026	1,040	1,058	1,079	1,103	1,130	1,160

Beispiel: Welche Wassermenge fliesst aus einer 2 Decimeter breiten und 2 Decimeter hohen Oeffnung, die 1,5 Decimeter über dem Boden in einer Wand angebracht ist, welche einen 5 Decimeter breiten Kanal verschliesst und das Wasser in demselben auf eine Höhe von 4 Decimeter über dem Gerinnboden aufstaut? — Die theoretische Ausflussmenge ist hier gleich $0{,}2 \times 0{,}2 \cdot \sqrt{2g \cdot 0{,}15}$ $= 0{,}0686$ Cubikmeter. Das Verhältniss des Querschnitts der Ausflussöffnung zu dem des zufliessenden Wassers ist gleich

$\frac{0,04}{0,2} = 0,20$. Nach der obigen Tabelle ist also der aus der ersten Tafel des §. 307 für unsern Fall folgende Ausflusscoëfficient 0,584 mit dem Factor 1,026 zu multipliciren. Man erhält dadurch als Ausflusscoëfficienten 0,599, und daher als wirkliche Ausflussmenge 0,0411 Cubikmeter.

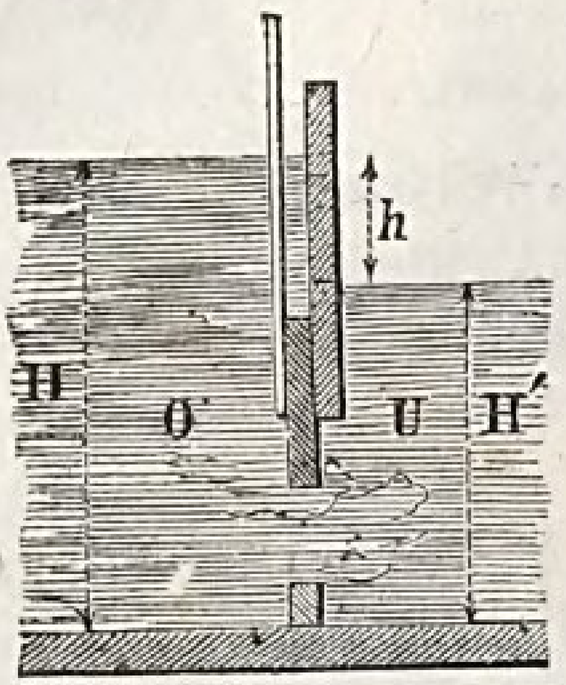


Fig. 482.

Wir haben bisher immer angenommen, dass der Ausfluss in die freie Luft stattfindet; in dem Falle, wo die Ausflussöffnung unter Wasser getaucht ist, wie es bei Schleusenöffnungen häufig vorkommt (Fig. 482), kann ganz dasselbe angewendet werden, was wir bisher gesagt haben; nur muss bei Berechnung der Ausflussmenge blos der Unterschied des Wasserstandes in den beiden Behältern, nämlich der Unterschied h der Höhe H des Oberwassers O und der H′ des Unterwassers U als Druckhöhe benützt werden. Diese Druckhöhe ist, wie man leicht sieht, an allen Stellen der Ausflussmündung dieselbe.

§. **346.** Wir haben bisher nur den Ausfluss durch solche Oeffnungen betrachtet, bei denen die oberste Kante noch unter dem Spiegel der Flüssigkeit im Reservoir gelegen ist; es kommen aber auch Fälle vor, wo das Wasser blos durch einen Einschnitt in der Wand des Reservoirs ausfliesst, d. h., wo die Oeffnung nach oben nicht begrenzt ist. Als Beispiele hiefür sind namentlich die sog. Ueberfälle und Wehre anzuführen (Fig. 483), die mitten in einem fliessenden Wasser angelegt werden, sodass dasselbe gezwungen wird, über ihren Rücken wegzufliessen. Wenn man den Ausfluss des Wassers bei einem solchen Ueberfall beobachtet, so sieht man sofort, dass sich die Oberfläche des Wassers schon sehr merkbar senkt, bevor es noch die Vertikalebene erreicht, welche durch die untere Kante der Oeffnung quer durch den Rücken des Wehres gelegt werden kann. Die Dicke ab der ausfliessenden Wasserschichte ist nicht grösser als 0,72 von der Höhe ac des Wasserniveaus über der untern Kante der Oeffnung,

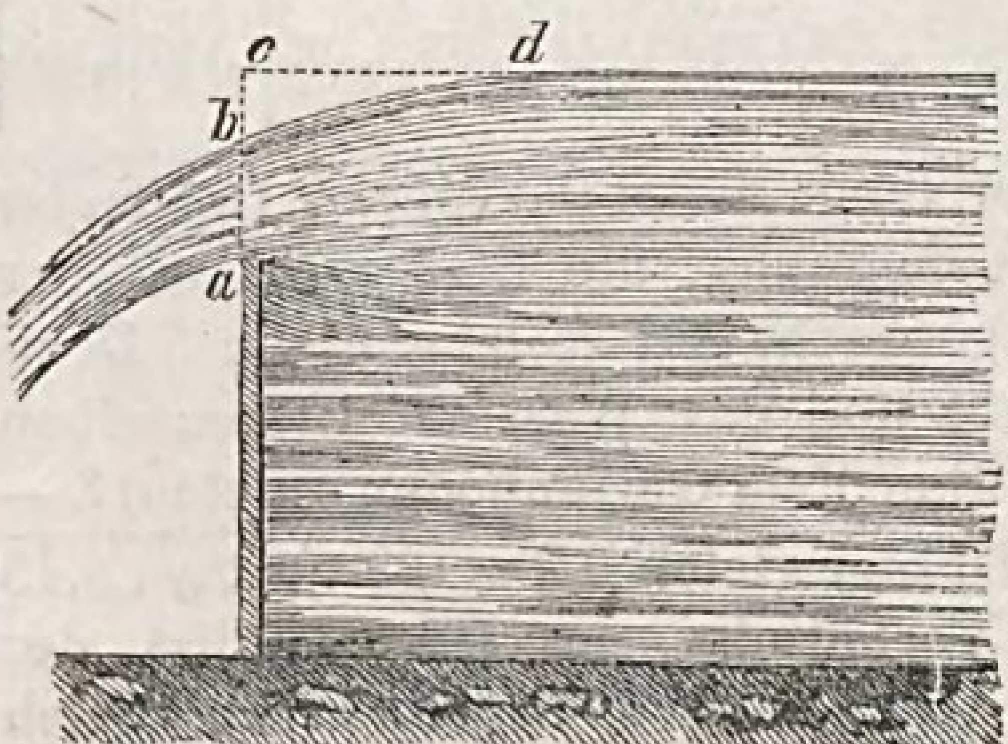


Fig. 483.

diese Höhe in so grosser Entfernung von der Oeffnung genommen, dass die Senkung nicht mehr merklich ist. Aus den zahlreichen Versuchen von *Poncelet* und *Lesbros* folgt, dass man, um die Wassermenge, welche in einer Secunde über einen Ueberfall fliesst, zu finden, in den in der Praxis gewöhnlich vorkommenden Fällen in folgender Weise verfahren kann. Man berechnet die Fläche des Rechtecks, welches die Breite des Ueberfalls zur Grundlinie und den Niveauunterschied ac zur Höhe hat; diese Fläche multiplicirt man mit der Geschwindigkeit, welche der Höhe ac entspricht (§. 115), und ausserdem noch mit dem Coëfficienten 0,405, so ist die erhaltene Zahl die gesuchte Wassermenge. Bei sehr kleinen Druckhöhen ac, bis zu 1 Centimeter herab, darf der Ausflusscoëfficient etwas grösser, bis zu 0,424 genommen werden; bei grösseren Höhen dagegen, bis zu 22 Centimeter, muss man den Ausflusscoëfficienten kleiner, bis zu 0,385 nehmen.

§. 347. **Der Saugheber.** — Mit dem Namen Saugheber bezeichnet man eine gebogene Röhre ABCD (Fig. 484), mittelst deren man die Flüssigkeit aus einem Gefäss M in ein anderes tiefer liegendes überführen kann, ohne in einer von der Flüssigkeit bespülten Wand des ersten Gefässes eine Oeffnung anbringen zu müssen. Man füllt zuerst diese Röhre vollständig mit Flüssigkeit, was meistens durch Saugen an dem Ende D geschieht, und gibt ihr dann die Stellung, wie sie die Figur anzeigt. Man sieht dann die Flüssigkeit aus dem Ende D des Hebers ohne Unterbrechung ausfliessen; das Gefäss M entleert sich mehr und mehr und der Ausfluss hört nicht eher auf, als bis sich die Flüssigkeit im Gefäss M unter das Ende A des Hebers gesenkt hat. Ausserdem ist es für die Fortdauer des Ausflusses nothwendig, dass das Ende D stets unter der Oberfläche der Flüssigkeit in M bleibt.

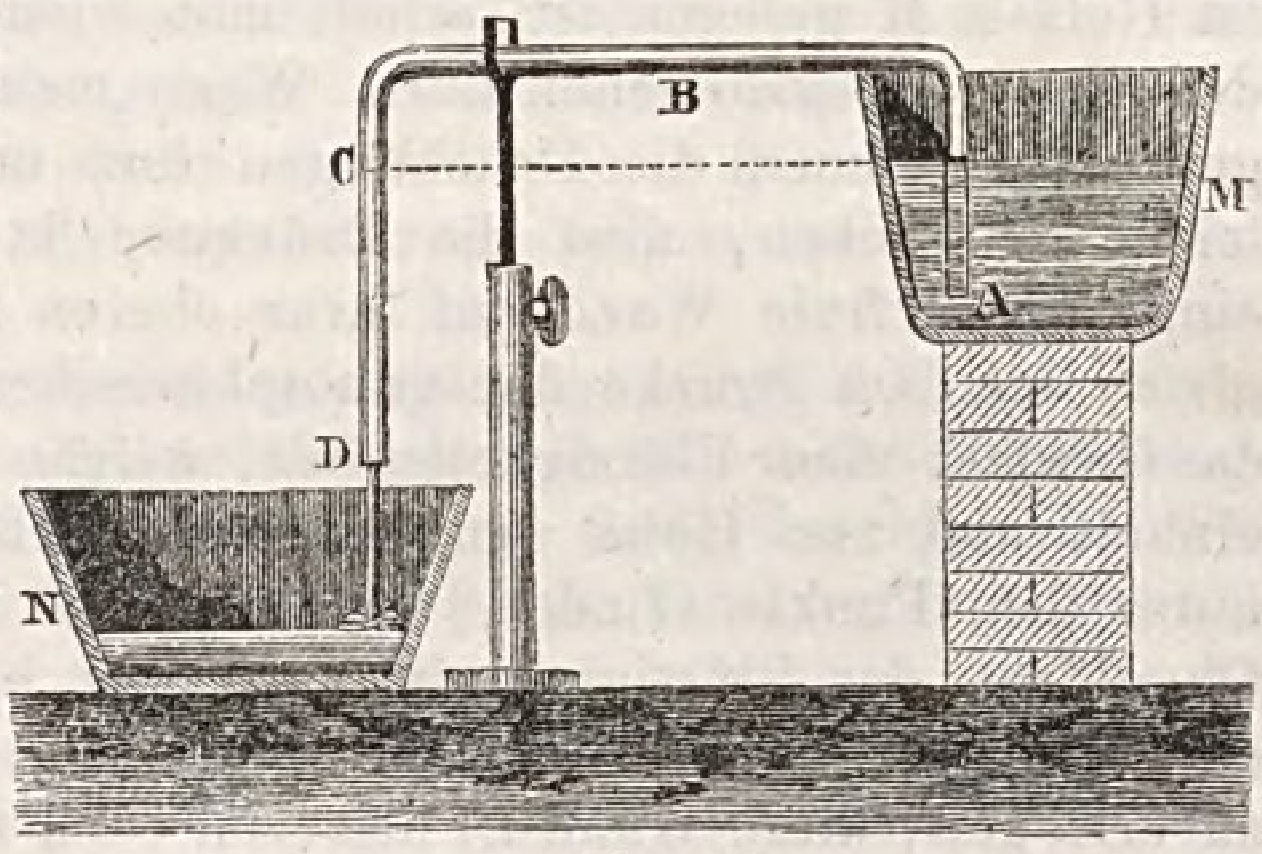


Fig. 484.

Um uns über die Wirkungsweise des Hebers Aufschluss zu verschaffen, denken wir uns an dem Ende D desselben eine feine Wand eingezogen, die diese Oeffnung verschliesst, und suchen

uns die Drückungen zu verschaffen, welche diese Wand auf ihren beiden Seiten zu erleiden hat. Auf die freie Oberfläche der Flüssigkeit im Gefäss M übt die atmosphärische Luft ihren Druck aus. Denselben Druck hat folglich die Flüssigkeit im Innern des in das Gefäss M tauchenden Schenkels des Hebers an der Stelle zu erleiden, die in gleicher Höhe mit der Oberfläche der Flüssigkeit in diesem Gefäss liegt. Wenn man sich von dieser Stelle aus in dem Heber erhebt, bis in den obersten Theil B desselben, so findet man, dass der Druck immer schwächer und schwächer wird, und zwar genau um die Grössen, um welche man sich erhebt; der Druck in B z. B. ist gleich dem Drucke der atmosphärischen Luft, vermindert um das Gewicht einer Flüssigkeitssäule, welche als Basis die Flächeneinheit und als Höhe den vertikalen Abstand des Punktes B über der freien Oberfläche der Flüssigkeit M hat. Wenn man hierauf in dem Heber weiter vorwärts geht und längs seines zweiten Schenkels wieder abwärts steigt, so wird man finden, dass die Drückungen in der Flüssigkeit wieder grösser und grösser werden, und im Punkte C angekommen, der im Niveau der freien Oberfläche der Flüssigkeit im Gefässe M gelegen ist, erhält man wieder einen Druck gleich dem der atmosphärischen Luft. Wenn man noch weiter abwärts geht, so nehmen die Drückungen fort und fort zu und es ist leicht einzusehen, dass die Drückung in D, welche die dort eingezogene freie Wand auf ihrer oberen Seite zu erleiden hat, gleich ist dem Drucke der atmosphärischen Luft, vermehrt um das Gewicht einer Flüssigkeitssäule, welche zur Basis die Flächeneinheit und zur Höhe den vertikalen Abstand des Punktes D unter dem Punkte C oder, was dasselbe ist, unter der freien Oberfläche der Flüssigkeit im Gefäss M hat. Die untere Seite der Wand bei D hat blos den Druck der atmosphärischen Luft zu ertragen; diese Wand ist also von oben nach unten stärker gedrückt als von unten nach oben und befindet sich offenbar ganz unter denselben Umständen, als wenn sie einen Theil der Wand des Gefässes M bildete, welcher in derselben vertikalen Entfernung wie sie unter der freien Oberfläche der Flüssigkeit in diesem Gefässe gelegen wäre. Man sieht daraus, dass, wenn man die Wand bei D, welche wir uns blos des besseren Verständnisses halber eingezogen dachten, wieder entfernt, die Flüssigkeit an dieser Stelle in Folge des Ueberschusses des Druckes von oben nach unten ausfliessen muss, und zwar mit einer Geschwindigkeit, welche ein Körper gewinnt, der eine Höhe gleich der vertikalen Entfernung des Endes D unter dem Spiegel der Flüssigkeit

in M frei herabfällt. In Wirklichkeit ist die Ausflussgeschwindigkeit zwar kleiner; aber dies ist nur eine Folge der plötzlichen Richtungsänderungen, welche die Flüssigkeitssäulen, indem sie bei dem Ende A des Hebers in denselben eintreten, erfahren, so wie auch der Reibung der Flüssigkeit an den inneren Wänden des Hebers (vergl. unten §. 354).

Damit der Heber die im Vorhergehenden beschriebene Wirkung zeigt, ist es nothwendig erforderlich, dass er sich in der atmosphärischen Luft befindet. Ohne den Druck, welchen die atmosphärische Luft auf die Oberfläche der Flüssigkeit in M ausübt, steigt diese Flüssigkeit nicht von A nach B. Im luftleeren Raum würde sich die Flüssigkeit, wenn sie auch anfangs die ganze Länge des Hebers ausfüllen würde, an dem höchsten Punkte der Röhre in zwei Theile theilen, von denen der eine in dem linken, der andere in dem rechten Schenkel herabfliessen würde. Auf dieselbe Weise sieht man ein, dass der Heber, selbst in dem Falle, wo er sich in der atmosphärischen Luft befindet, nicht in Wirksamkeit treten kann, wenn seine Dimensionen im verticalen Sinne zu gross werden; denn man weiss, dass eine Flüssigkeit durch den Druck der atmosphärischen Luft nur auf eine gewisse Höhe, die nicht grösser als die Höhe der Säule von derselben Flüssigkeit ist, deren Gewicht dem Drucke der atmosphärischen Luft das Gleichgewicht zu halten vermag, gehoben werden kann (§. 309).

Damit der Heber bequemer angesaugt werden kann, bringt man gewöhnlich eine Seitenröhre an ihm an, welche nahe dem Ende D in ihn einmündet und dann zur Seite des Schenkels CD in die Höhe steigt. Wenn der Heber, ohne vorher angefüllt worden zu sein, in die Stellung gebracht worden ist, welche er während des Durchflusses der Flüssigkeit einnehmen muss, so schliesst man das Ende D mittelst des Fingers oder eines Pfropfens und saugt hierauf an dem oberen Ende der Seitenröhre, von welcher wir oben gesprochen haben. Dieses Saugen bringt eine Verminderung des Druckes der Luft im Innern des Hebers, die von der äusseren Luft vollständig abgesperrt ist, hervor; in Folge dessen steigt die Flüssigkeit des Gefässes von A nach B und fällt von B nach D von selbst herab. Man sagt dann, der Heber ist angesaugt, und es reicht hin, den Finger oder den Pfropfen, mit welchem man das Ende D verschlossen hielt, wieder zu entfernen, um den Ausfluss beginnen zu lassen. — Man bedient sich des Hebers meistens, um Fässer, die mit Wein oder sonst einer Flüssigkeit gefüllt sind, zu entleeren, ohne in einem der Böden

der Fässer ein Loch anbringen zu müssen; in diesem Falle ist der Heber gewöhnlich von Weissblech und so gemacht, dass er leicht in das Spundloch des Fasses eingebracht werden kann, sodass noch rings um ihn der Luft der freie Eintritt in das Fass, welches sie in dem Maasse erfüllen muss, als der Wein aus demselben ausfliesst, gestattet ist.

§. 348. **Constanter Ausfluss.** — Damit die Geschwindigkeit, mit welcher eine Flüssigkeit aus einer Oeffnung strömt, fortwährend die nämliche bleibt, ist es nothwendig, dass der Druck in dieser Oeffnung keine Aenderung erleidet, d. h. dass die freie Oberfläche der Flüssigkeit in dem Gefässe, aus welchem sie fliesst, stets in gleicher Höhe über der Oeffnung bleibt. Wir haben schon in §. 311 ein Mittel kennen gelernt, ein solches constantes Niveau zu erhalten. Ein anderes Mittel, dessen man sich namentlich bedient, wenn man es mit grösseren Flüssigkeitsmengen zu thun hat, besteht darin, dass man in das Reservoir, aus dem der Ausfluss stattfinden soll, fortwährend einen Flüssigkeitsstrom leitet und in einer der Seitenwände dieses Reservoirs einen Einschnitt anbringt, dessen untere Kante dem constanten Niveau entspricht, welches die Flüssigkeit behalten soll. Wenn die Quelle, durch welche das Reservoir gespeist wird, mehr Flüssigkeit liefert, als sich durch die Oeffnung ergiessen kann, so fliesst der Ueberschuss durch diesen Einschnitt aus, und das Niveau wird folglich nicht geändert. Dieses letztere Mittel wird häufig im Grossen angewendet, um die Ausflussgeschwindigkeit des Wassers zu reguliren, welches dazu bestimmt ist, ein Wasserrad zu treiben.

§. 349. **Intermittirender Ausfluss.** — Der in Fig. 485 abgebildete intermittirende Brunnen ist ein Apparat, durch welchen ein intermittirender Ausfluss hervorgebracht wird. Ein Gefäss A enthält Wasser und endigt sich unten in vier Oeffnungen B, B, durch welche dieses Wasser ausfliessen kann. Dieses Gefäss steht an seinem oberen Theil nicht mit der atmosphärischen Luft in Verbindung; aber es ist unten von einer vertikalen Röhre C D durchdrungen, die an beiden Enden offen ist; durch diese Röhre kann das Innere des Gefässes A mit der atmosphärischen Luft communiciren. Diese Communication gestattet der atmosphärischen Luft ihren Druck frei auf die Oberfläche des Wassers im Gefässe A auszuüben; dieses fliesst folglich bei den Oeffnungen B, B aus und fällt in die Schale E herab. In dieser Schale befindet sich ein Loch O, durch welches das Wasser in eine zweite Schale herabfliessen kann, die unter der ersten angebracht ist. Aber

die Oeffnung O lässt nicht so viel Wasser austreten als in der Schale E ankommt, und in Folge dessen hebt sich das Niveau der Flüssigkeit in dieser Schale und erreicht bald eine solche Höhe, dass es das untere Ende D der Röhre, durch welche hindurch die atmosphärische Luft ihren Druck auf das Wasser im Gefäss A ausübt, verschliesst. Von da an findet der Ausfluss durch die Oeffnungen B, B nicht mehr unter denselben Bedingungen wie vorhin statt. Der Druck, welcher durch die Luft über der Flüssigkeit in A ausgeübt wird, vermindert sich nach und nach in dem Maasse, als das

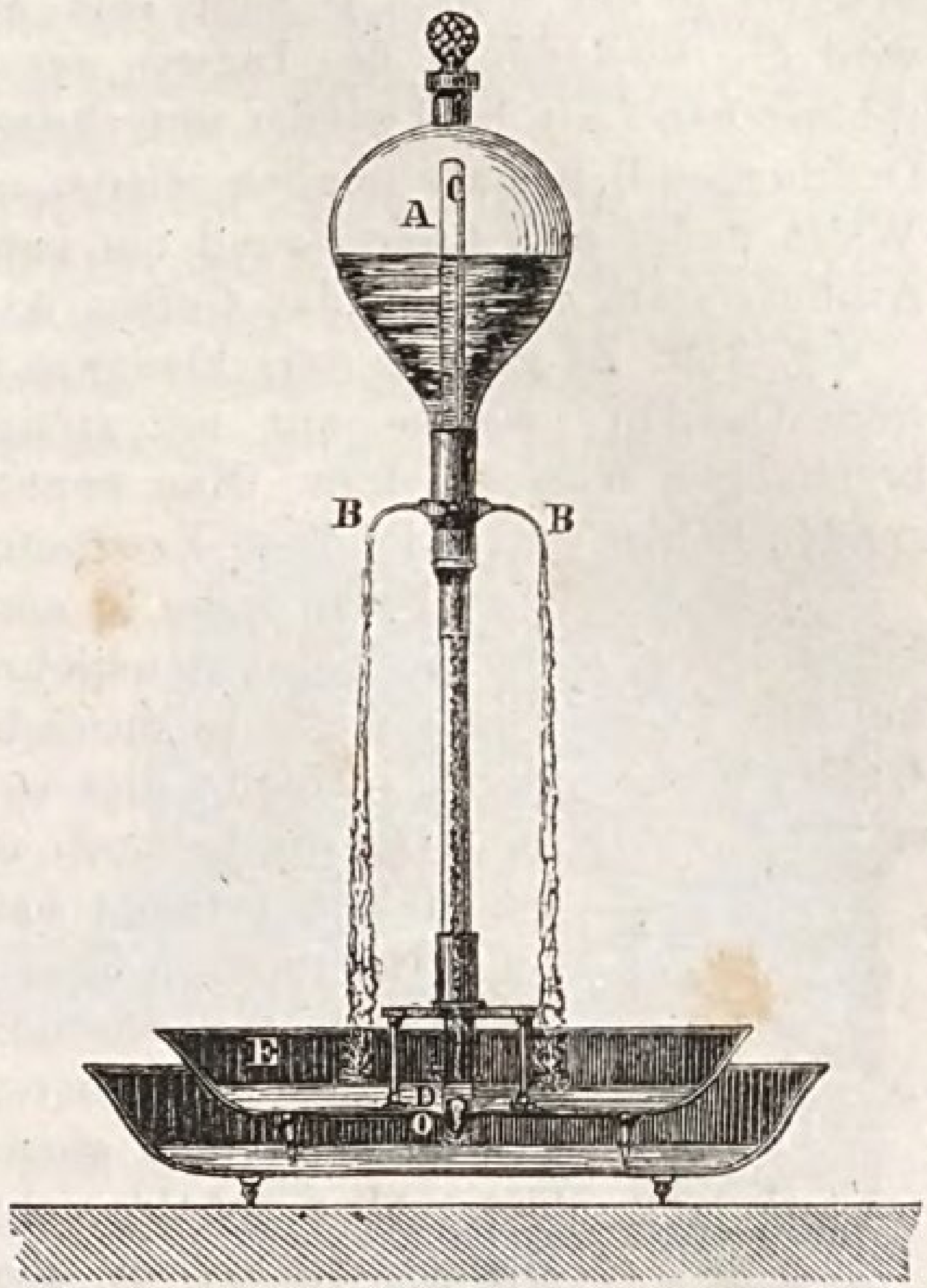


Fig. 485.

Wasser fortfährt, durch die Oeffnungen B, B auszufliessen, da diese Luft, nun von der Atmosphäre isolirt, einen immer grössern und grössern Raum einnimmt. Die Ausflussgeschwindigkeit durch die Oeffnungen B, B muss sich also allmählich vermindern und der Ausfluss wird endlich ganz aufhören, wenn der Ueberschuss des Druckes der äussern atmosphärischen Luft über den Druck, welchen das Wasser im Gefäss A seitens der in demselben enthaltenen Luft zu erleiden hat, im Stande ist, den Wassersäulen über den Oeffnungen B, B das Gleichgewicht zu halten. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Oeffnungen B, B klein genug sind, sodass das Wasser nicht in einem Theil ihrer Breite ausfliesst, während in dem andern die atmosphärische Luft einströmt. Aber das Wasser, welches sich in der Schale E angesammelt hat, strömt fortwährend durch die Oeffnung O aus; und da es nun nicht mehr erneuert wird, so sinkt sein Niveau mehr und mehr, und dadurch wird das untere Ende D der vertikalen Röhre CD bald wieder geöffnet. Dann communicirt die atmosphärische Luft von Neuem mit dem Innern des Gefässes A, der Ausfluss durch die Oeffnungen B, B beginnt also wieder und der Spiegel des

Wassers in der Schale D hebt sich auf's Neue. Dadurch aber wird die Verbindung des Innern des Gefässes A mit der atmosphärischen Luft bald wieder unterbrochen, der Ausfluss durch die Oeffnungen B, B muss folglich wieder aufhören u. s. f. Auf diese Weise findet also fortwährend ein immer wieder unterbrochener Ausfluss statt, so lange das Gefäss A noch Wasser enthält.

§. 350. Es gibt an verschiedenen Orten auf der Erde natürliche Quellen, welche nur mit stetig wiederkehrenden Unterbrechungen Wasser liefern. Man nennt solche Quellen intermittirende. Sehen wir, wie diese Erscheinung erklärt werden kann.

Denken wis uns, man habe in einem Gefäss (Fig. 486) eine heberförmig gebogene Röhre so angebracht, dass ihr einer Schenkel den Boden dieses Gefässes durchdringt. Wenn man in das Gefäss Wasser giesst, so bleibt dies so lange in dem Gefässe als seine Oberfläche noch nicht den höchsten Theil C des Hebers erreicht hat. Da die atmosphärische Luft den unteren Theil des grösseren Schenkels des Hebers frei durchdringen kann, so tritt das Wasser in den kleineren Schenkel ein und stellt sich in demselben ebenso hoch wie aussen im Gefäss. Aber sobald sich die freie Oberfläche des Wassers im Gefäss über den höchsten Punkt C des Hebers erhebt, fliesst das Wasser, welches in das Innere desselben eingedrungen ist, auch in den grossen Schenkel des Hebers ein; der Heber ist nun angesaugt und das Gefäss entleert sich durch denselben, bis das Niveau AB des Wassers unter das untere Ende des kleinen Schenkels des Hebers herabgesunken ist.

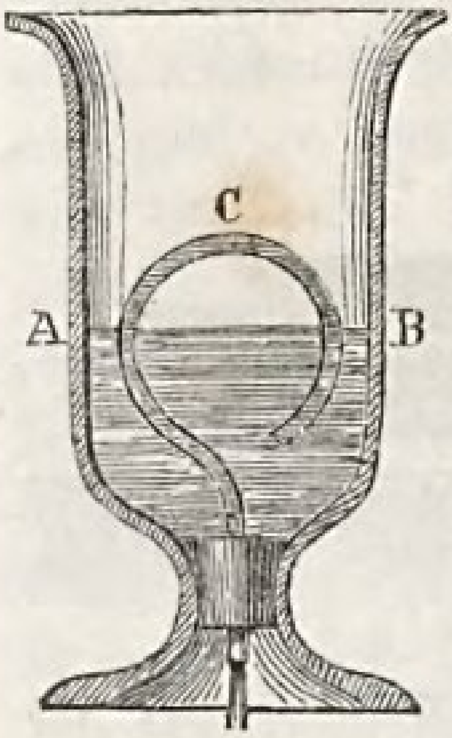


Fig. 486.

Um mit Hilfe des in Rede stehenden Apparats einen intermittirenden Ausfluss zu erhalten, darf man nur in das Gefäss einen kleinen Strom von Wasser leiten, der ohne Unterbrechung fortfliesst. Das Gefäss füllt sich mehr und mehr, die Oberfläche AB des Wassers steigt allmählich; bald ist der Heber gefüllt und das Wasser strömt nun durch denselben aus. Wenn sich auf diese Weise die Oberfläche des Wassers im Gefäss weit genug gesenkt hat, so kann der Heber nicht mehr in Thätigkeit bleiben und entleert sich von selbst. Hierauf füllt sich das Gefäss von Neuem, der Ausfluss durch den Heber beginnt aber erst wieder, nachdem sich die Oberfläche des Wassers auf's Neue bis C erhoben hat. Es ist klar, dass, um auf diese Weise einen intermittirenden Ausfluss zu erhalten, die Wassermenge, welche durch den Heber ausströmt, grösser sein muss als die, welche

in gleicher Zeit in das Gefäss einfliesst; denn ohne dieses würde der Heber das Gefäss nicht allmählich entleeren können, sondern fortwährend angesaugt bleiben.

Die natürlichen intermittirenden Quellen können durch eine besondere Anordnung von Gängen und Höhlungen im Innern der Erde ähnlich derjenigen des Apparates, von dem wir soeben gesprochen haben, bedingt werden. Denken wir uns, dass im Innern der Erde eine Höhlung vorhanden ist (Fig. 487), welche sich allmählich mit Wasser füllt, sei es, dass dieses langsam durch das lockere Erdreich durchsickert, sei es, dass es in einem kleinen Strom durch eine enge Spalte zufliesst. Stellen wir uns ferner vor, dass diese Höhlung nach aussen durch

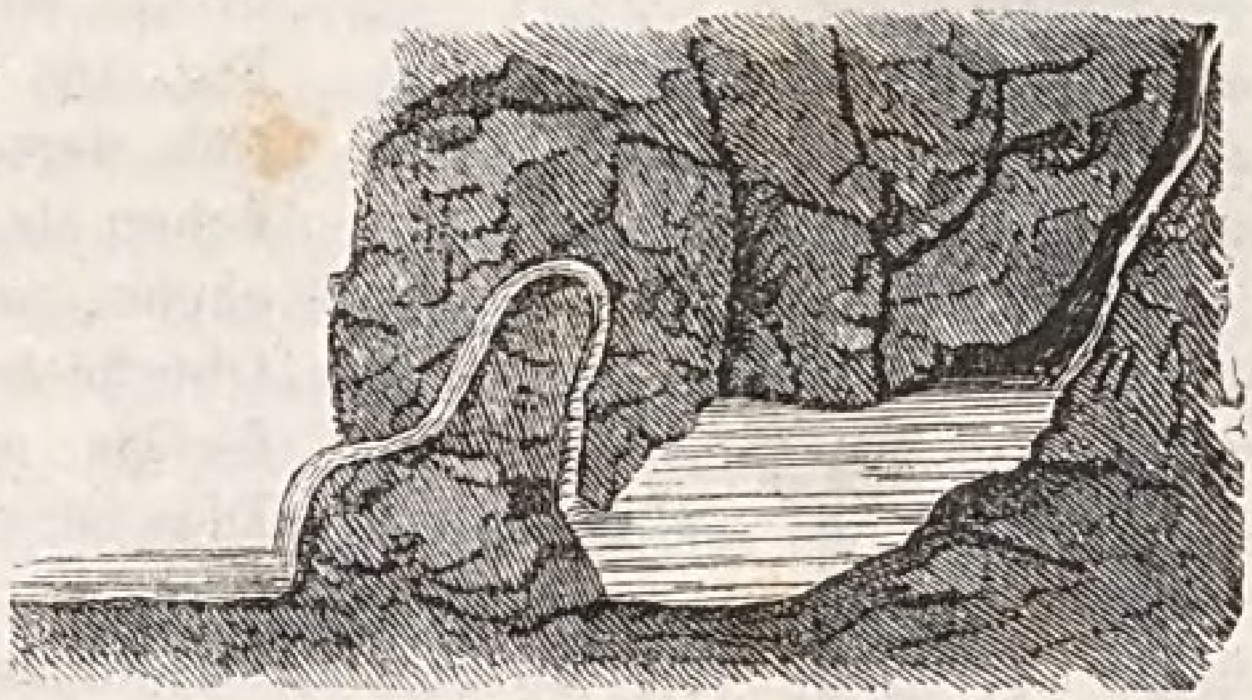


Fig. 487.

einen engen Kanal, welcher sich anfangs erhebt, um sich darauf wieder herabzusenken, sodass er eine Art von Heber bildet, communicire. Das Wasser sammelt sich in der Höhlung an, bis sich sein Niveau in der Höhe des höchsten Punktes des letzterwähnten Kanals befindet. Bei neuem Zufluss wird sich folglich der Heber füllen und das Wasser wird sich durch ihn nach Aussen ergiessen. Wenn dadurch die Oberfläche des Wassers in der Höhlung bis unter das Ende des in dieselbe mündenden Heberschenkels herabgesunken ist, so entleert sich der Heber, und seine Wirksamkeit hört auf; die Höhlung kann sich nun von Neuem allmählich füllen, bis der Heber wieder voll geworden ist und seine Thätigkeit von Neuem beginnt u. s. f. Damit das Wasser aus dem inneren Reservoir durch den Heber ausfliessen kann, ist es nöthig, dass seine Oberfläche dem Drucke der atmosphärischen Luft ausgesetzt ist (§. 347), und dass die äussere Luft leicht in die Höhlung eindringen kann, während das Wasser ausfliesst; diese Bedingung findet sich aber leicht erfüllt; die zahlreichen Spalten und Ritzen, welche in den meisten Fällen das Innere der Erde durchziehen und die mit der äusseren atmosphärischen Luft in Verbindung stehen, gestatten dieser letzteren auf's Leichteste den Zugang. Die übrige Anordnung, durch welche, wie angegeben, das Zustandekommen einer intermittirenden Quelle bedingt wird, erfordert aber, wie man sieht,

keineswegs das Zusammentreffen einer grossen Anzahl von besonderen Umständen; man begreift also recht wohl, dass sie sich an mehreren Orten, allein durch das Spiel des Zufalls, darbieten können.

§. 351. **Heronsbrunnen.** — Wenn man die Flüssigkeit, welche in einem Gefäss enthalten ist, durch eine Oeffnung ausströmen lässt, die so angebracht wurde, dass der Strahl vertikal in die Höhe steigt, wie in der Fig. 463 (Seite 669), so kann sich derselbe nicht höher erheben als bis zu der Horizontalebene, welche durch die freie Oberfläche der Flüssigkeit im Gefäss gelegt werden kann. Dies ist nicht mehr so in dem Fall, wo die Flüssigkeit im Gefäss in zwei Theile getheilt ist, die durch eine Gasmasse von einander getrennt sind; der Flüssigkeitsstrahl kann sich in diesem Fall auf eine viel grössere Höhe erheben, als die ist, welche durch die freie Oberfläche im Reservoir bestimmt wird. Dies ist mittelst des Apparats, der unter dem Namen des Heronsbrunnens bekannt ist, leicht einzusehen (*Heron*, der Erfinder dieses Apparates, lebte zu Alexandrien um das Jahr 120 v. Chr.). In der Gestalt, wie Fig. 488 diesen Apparat darstellt, besteht er einfach aus einer mehrmals gebogenen Glasröhre, deren eines Ende A sich trichterförmig erweitert, und welche ausserdem noch zwei kugelförmige Erweiterungen B und C zeigt, welche als Reservoirs dienen. Wenn diese gebogene Röhre

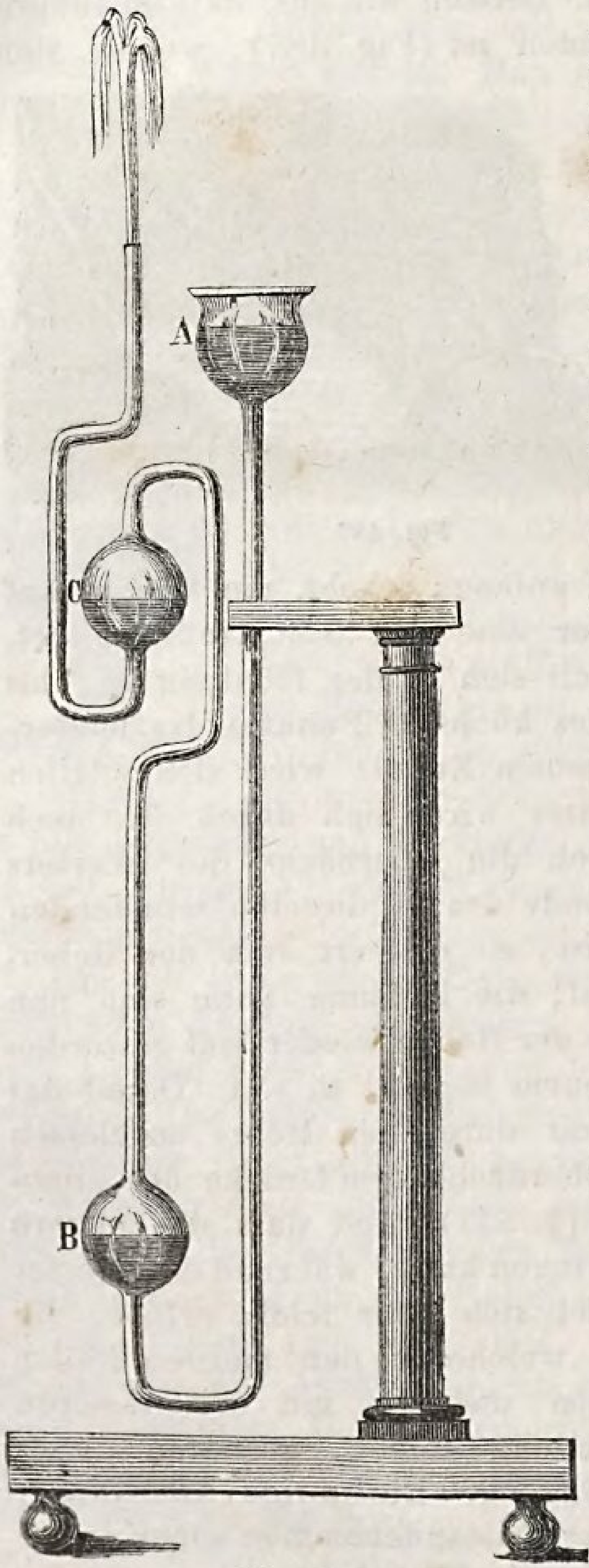


Fig. 488.

blos Wasser enthielte, und wenn sich diese Flüssigkeit in dem rechten Schenkel der Röhre bis in den Trichter A erheben würde, wie es die Fig. 488 anzeigt, so müsste sie, nach dem Gesetz der communicirenden Gefässe, in dem linken Schenkel in gleicher Höhe stehen. Das Wasser reicht aber von dem Trichter A blos bis zur Kugel B; über der Oberfläche des Wassers in dieser Kugel befindet sich eine gewisse Quantität Luft, die sich bis in die Kugel C erstreckt; der übrige Theil der Röhre endlich, von C an ist wieder mit Wasser gefüllt. Die Gegenwart der Luft zwischen den beiden Wassermassen ändert das Verhalten der Flüssigkeit wesentlich. Diese Luft ist, so zu sagen, in ein Gefäss eingeschlossen, von welchem die Oberflächen des Wassers in B und C einen Theil der Wände bilden; sie übt also in Folge ihrer Spannkraft gegen die verschiedenen Punkte dieser Oberflächen Drückungen aus, die wir, unter Vernachlässigung des nur äusserst geringen Gewichtes dieser Luftmasse, als gleich gross betrachten können. Der Druck, welchen die Oberfläche des Wassers in der Kugel C zu erleiden hat, ist also derselbe als der, welcher durch eine Wassersäule hervorgebracht würde, die unmittelbar über dieser Oberfläche stünde und sich bis zu einer Höhe gleich dem vertikalen Abstande des Spiegels in A über den in B erhöbe. Wenn folglich die Röhre, welche von dem unteren Theil der Kugel C ausgeht und sich darauf vertikal erhebt, lang genug wäre, so müsste in derselben das Wasser so hoch über der Oberfläche in C stehen als der Spiegel in A über dem in B; in dem Fall also, wo, wie in unserer Figur, die Röhre nicht die erforderliche Länge hat, muss ein vertikaler Strahl Wasser aus der oberen Oeffnung derselben herausspringen und sich nahezu bis in eine Höhe über dem Spiegel in C erheben, welche gleich dem vertikalen Abstande des Spiegels in A über den in B ist. Der Heronsbrunnen ist also eine Art künstlicher Springbrunnen und wird in der That als solcher in Zimmern, in den Schaufenstern der Läden etc. benützt. Seine Constructionstheile sind dann gewöhnlich durch Verzierungen verdeckt oder im Inneren von Figuren versteckt.

§. 352. **Bewegung der Flüssigkeiten in Röhren.** — Wenn eine Flüssigkeit eine Röhre durchfliesst, indem sie dieselbe vollständig ausfüllt, so erfährt sie von Seite der Wände der Röhre einen Widerstand, welcher ihre Geschwindigkeit bedeutend vermindert. Um sich über die Art und Weise, auf welche dieser Widerstand hervorgebracht wird, genaue Rechenschaft zu verschaffen, muss man beachten, dass die Molekülschichte, welche

zunächst an den Wänden der Röhre dahingleitet, eine Reibung entwickelt, welche ihre Bewegung verzögert. Diese Verzögerung überträgt sich nicht in dem nämlichen Grade auf die zweite nach innen gelegene Molekülschichte, welche von jener ersten umhüllt wird; denn die Reibung zwischen den beiden Molekülschichten ist einmal schon wegen der kleineren Berührungsfläche, dann aber auch wohl in den meisten Fällen wegen der verschiedenen Natur der sich reibenden Flächen kleiner als die zwischen der ersten und den Wänden der Röhre. Die zweite ringförmige Molekülschichte bewegt sich also schneller als die erste; sie gleitet über der ersteren hin und entwickelt dadurch eine Reibung, welche ihre eigene Bewegung verzögert, die der ersten Schichte dagegen beschleunigt. Aehnliches findet bei der dritten, vierten etc. Molekülschichte statt. Wenn also der Ausfluss der Flüssigkeit regelmässig geworden ist, so kann man sich vorstellen, dass diese Flüssigkeit von verschiedenen ringförmigen Schichten gebildet ist, von denen immer die eine von der anderen umhüllt wird, und welche sich, indem sie sich der ganzen Länge der Röhre nach erstrecken, jede mit der ihr eigenen Geschwindigkeit bewegen. Die erste Schichte, welche alle anderen umhüllt, ist diejenige, deren Geschwindigkeit am kleinsten ist; die zweite Schichte bewegt sich etwas schneller, die dritte noch schneller und die innerste Schichte endlich, welche sich auf einen einfachen Flüssigkeitsfaden reducirt, besitzt die grösste Geschwindigkeit. Das Gleiten jeder dieser Schichten innerhalb derjenigen, von welcher sie umhüllt wird, ruft eine Reibung hervor, welche die Geschwindigkeit dieser umhüllten Schichte zu vermindern, die der umhüllenden dagegen zu vergrössern sucht. Jede Schichte ist demnach zweier aus den Reibungen entspringender Gruppen von Kräften unterworfen, von denen die einen, welche an ihrer äusseren Oberfläche thätig sind, ihre Bewegung zu verzögern suchen, während die anderen, an ihrer inneren Oberfläche wirkenden, das Bestreben haben, ihre Bewegung zu beschleunigen; aber die erste dieser Gruppen überwiegt die zweite und die Schichte erleidet also schliesslich einen Widerstand, welcher ihre Geschwindigkeit zu vermindern sucht. Eine Folge aller dieser Widerstände, welche auf die verschiedenen Schichten wirken, ist offenbar die, dass die Gesammtmenge der Flüssigkeit, welche die Röhre in einer bestimmten Zeit durchfliesst, verkleinert wird.

§. 353. Nach dem, was wir soeben gesehen haben, sind die Geschwindigkeiten der Flüssigkeitsmoleküle, welche in demselben

Augenblick durch einen und denselben Querschnitt der Röhre hindurchgehen, nicht die nämlichen; diese Geschwindigkeiten sind um so grösser, je weiter die Moleküle von den Wänden entfernt sind, und das im Mittelpunkt des Querschnitts gelegene Molekül hat die grösste Geschwindigkeit. Die Flüssigkeitsmenge, welche in dem Zeitraume von einer Secunde diesen Querschnitt durchdringt, ist von diesen verschiedenen Geschwindigkeiten abhängig. Wenn der Durchfluss der Flüssigkeit durch die Röhre so stattfände, dass alle Flüssigkeitsmoleküle eine und die nämliche Geschwindigkeit besässen, sodass sich also die Flüssigkeit wie eine zusammenhängende Masse bewegte, so erhielte man das Volumen der Flüssigkeit, welche in einer Secunde durch einen Querschnitt der Röhre hindurchfliesst, indem man den Flächeninhalt dieses Querschnitts mit der Geschwindigkeit der Flüssigkeit multiplicirte; umgekehrt würde man die Geschwindigkeit der Flüssigkeit erhalten, wenn man die in einer Secunde durch die Röhre ausfliessende Flüssigkeitsmenge durch den Flächeninhalt des betreffenden Querschnitts der Röhre dividiren würde. Da aber in Wirklichkeit die Geschwindigkeiten der verschiedenen Flüssigkeitsmoleküle eines Querschnitts nicht gleich gross sind, so kann man das Volumen der Flüssigkeit, welche in einer Secunde durch einen Querschnitt der Röhre fliesst, nicht auf die oben angegebene Art berechnen. Wenn man daher das Flüssigkeitsvolumen, welches in einer Secunde durch einen bestimmten Querschnitt hindurchfliesst, durch den Flächeninhalt dieses Querschnitts dividirt, so gibt die erhaltene Zahl nicht die Geschwindigkeit der verschiedenen Flüssigkeitsmoleküle, schon desshalb nicht, weil diese verschiedene Geschwindigkeiten besitzen; aber diese Zahl drückt eine m i t t l e r e Geschwindigkeit aus, die Geschwindigkeit nämlich, welche die Flüssigkeit besitzen müsste, wenn sie sich wie ein zusammenhängendes Stück in der Röhre bewegen würde und doch die nämliche A u s f l u s s m e n g e (§. 337) ergeben sollte. Diese mittlere Geschwindigkeit meint man, wenn man von der Geschwindigkeit der Flüssigkeit in einem betrachteten Querschnitt im Allgemeinen spricht. Wenn z. B. der Querschnitt einer Röhre 3 Quadrat-Decimeter misst, und in einer Secunde 24 Liter oder 24 Cubik-Decimeter Flüssigkeit durch denselben strömen, so sagt man, die Geschwindigkeit in diesem Querschnitt betrage 8 Decimeter in der Secunde.

Aus den vielen Versuchen, welche *Prony* an gusseisernen Röhren anstellte, fand er für die mittlere Geschwindigkeit des aus einer solchen Röhre hervorströmenden Wassers die Formel:

$$v = 26{,}79 \cdot \sqrt{\frac{dh}{l}}$$

in welcher d den inneren Durchmesser der Röhre, l ihre Länge und h den vertikalen Abstand des Endes der Röhre unter dem Spiegel des Wassers in dem Reservoir, aus welchem der Ausfluss geschieht, bezeichnet. Hiebei hat man der Zahl v dieselbe Längeneinheit, nämlich den Meter, beizulegen, in welcher die Grössen d, h und l ausgedrückt worden sind. Diese Formel stimmt recht gut mit den Versuchen überein, so lange d nicht kleiner als 1 Centimeter wird und die Länge l mindestens 100mal so gross als der Durchmesser d der Röhre ist.

§. 354. Wenn die Röhre, in welcher sich die Flüssigkeit bewegt, überall den nämlichen Querschnitt hat, so muss die Geschwindigkeit der Flüssigkeit in all' den Querschnitten, welche man sich längs der ganzen Röhre gemacht denken kann, die nämliche sein. Denn da die Gesammtmenge der Flüssigkeit, welche zwischen zweien dieser Querschnitte enthalten ist, keine Aenderung erleiden kann, so muss das Flüssigkeitsvolumen, welches durch den einen dieser Querschnitte in den zwischen beiden enthaltenen Raum eintritt, gleich sein dem Volumen der in derselben Zeit durch den andern Querschnitt aus diesem Raume austretenden Flüssigkeit. Dies kann aber nur der Fall sein, wenn die Geschwindigkeiten in diesen beiden gleichen Querschnitten gleich gross sind. Die verschiedenen Flüssigkeitsmoleküle sind also, jedes für sich, in gleichförmiger Bewegung begriffen und es müssen sich folglich die Kräfte, welche an jedem von ihnen wirken, das Gleichgewicht halten. Wenn wir, anstatt ein einziges Molekül, die Flüssigkeitsmasse nehmen, welche zwischen zweien in kleiner Entfernung von einander gelegenen Querschnitten der Röhre enthalten ist, so sieht man leicht, dass auch zwischen all' den Kräften, welche an dieser Flüssigkeitsmasse angreifen, Gleichgewicht bestehen muss. Diese Kräfte sind aber: 1) In dem Falle, wo die Achse der Röhre in dem Theil, wo sich unsere Flüssigkeitsmasse befindet, gegen den Horizont geneigt ist, diejenige Componente des Gewichtes dieser Flüssigkeitsmasse, die parallel der Axe der Röhre, also parallel zur Bewegung ist; die andere senkrecht zur Bewegung gerichtete Componente hat direkt keinen Einfluss auf diese Bewegung. 2) Die Drückungen, welche die Flüssigkeitsmasse an den beiden ebenen Flächen, durch welche sie auf beiden Seiten in Berührung mit der benachbarten Flüssigkeit steht, erleidet. Diese Drückungen sind einander entgegengesetzt und geben eine Resultante, die gleich ihrer Differenz und im Sinne der grösseren

von beiden gerichtet ist. Solche Drückungen finden zwar auch in den Punkten unserer Flüssigkeitsmasse statt, in welchen sie mit den Wänden der Röhre in Berührung steht; aber dort sind sie senkrecht auf die Richtung der Bewegung gerichtet und können daher keinen direkten Einfluss auf dieselbe haben. 3) Die verschiedenen oben bereits besprochenen Reibungen, welche zwischen den verschiedenen, in einander gleitenden ringförmigen Flüssigkeitsschichten, sowie zwischen den äussersten dieser Schichten und der Wand entwickelt werden. Dieselben lassen sich offenbar sämmtlich in eine einzige Kraft, die der Richtung der Bewegung der Flüssigkeit immer entgegengesetzt ist, zusammenfassen. Die erste der eben aufgezählten drei Kräfte wirkt im Sinne der Bewegung, wenn die Flüssigkeit in dem geneigten Theil der Röhre, in welchem wir sie voraussetzen, abwärts geht; sie wirkt im Gegentheil der Bewegung entgegen, wenn die Flüssigkeit aufwärts steigt; sie ist endlich gleich Null, wenn der Theil der Röhre, wo sich die betrachtete Flüssigkeit befindet, horizontal ist. Die zweite Kraft wirkt im Sinne der Bewegung oder in entgegengesetzter Richtung, je nachdem der Druck, welcher auf die hintere Fläche der Flüssigkeitsmasse ausgeübt wird, grösser oder kleiner als der auf die vordere Fläche ausgeübte ist; sie ist Null, wenn diese beiden Drückungen gleich gross sind. Weil die dritte Kraft, diejenige nämlich, welche aus den Reibungen der Flüssigkeitsschichten an einander und an den Wänden der Röhre entspringt, stets der Richtung der Bewegung entgegengesetzt ist, so folgt, dass e i n e der beiden ersten Kräfte wenigstens im Sinne der Bewegung wirken muss, denn sonst könnten sich ja diese drei Kräfte, welchen die Flüssigkeitsmasse ausgesetzt ist, niemals das Gleichgewicht halten. In jedem Fall muss die Summe der beiden Kräfte, welche in gleichem Sinne wirken, gleich der in entgegengesetzter Richtung thätigen Kraft sein.

§. 355. Wenn man den Durchfluss einer Flüssigkeit durch eine Röhre genau beobachtet, so ist es leicht, die beiden ersten der soeben besprochenen drei Kräfte, welche an einer zwischen bestimmten Querschnitten der Röhre gelegenen Flüssigkeitsmasse angreifen, kennen zu lernen. Die erste erhält man, wenn man das Volumen der zwischen den beiden Querschnitten liegenden Flüssigkeitsmasse berechnet; aus diesem erhält man das Gewicht derselben, und wenn man dieses Gewicht in zwei Seitenkräfte zerlegt, von denen die eine parallel zur Achse der Röhre, die andere senkrecht dazu ist (§. 52), so ist die erste dieser Com-

ponenten die gesuchte Kraft. Um die zweite zu erhalten, bestimmt man den Druck, welcher auf jede der beiden ebenen Begrenzungsflächen am vorderen und hinteren Ende der betrachteten Flüssigkeitsmasse ausgeübt wird, indem man auf der Ausflussröhre an den betreffenden Stellen vertikale Glasröhrchen befestigt und die Höhen misst, bis zu welcher sich die Flüssigkeit in diesen Röhrchen in Folge des Druckes, der an den untersten Enden derselben ausgeübt wird, erhebt. Wenn auf diese Weise die beiden ersten Kräfte gefunden sind, so erlaubt die Gleichgewichtsbedingung, welche wir am Schlusse des vorigen Paragraphen aufgestellt haben, die dritte von den drei Kräften, welche auf die in Rede stehende Flüssigkeitsmasse wirken, also den Widerstand, der durch die Reibungen hervorgerufen wird, zu bestimmen.

Zahlreiche Versuche haben gelehrt, dass für eine und dieselbe Geschwindigkeit der Flüssigkeit dieser Widerstand proportional der Grösse der Fläche ist, in welcher die in Rede stehende Flüssigkeitsmasse die Wände der Röhre berührt. Daraus folgt: 1) Wenn man sich verschiedene solche Flüssigkeitsmassen denkt, die in einer und derselben Röhre von durchweg gleichem Querschnitt verschiedene Längen annehmen, so ist der Widerstand, welchen sie erfahren, ihrer Länge proportional. 2) Flüssigkeitsmassen, die in verschieden weiten Röhren gleiche Längen einnehmen und sich mit gleicher Geschwindigkeit bewegen, erleiden Widerstände, die den Umfängen der Querschnitte der Röhren proportional sind.

Wenn sich die Geschwindigkeit der Flüssigkeit ändert, dann ändert sich auch, entgegengesetzt mit dem, was beim Gleiten zweier fester Körper auf einander stattfindet (§. 166), der Widerstand, der durch die Reibungen hervorgebracht wird. Bei gleicher Grösse der Fläche, in welcher die zwischen zwei Querschnitten enthaltene Flüssigkeitsmasse die Röhrenwände berührt, ist der Widerstand, den diese Flüssigkeitsmasse erfährt um so grösser, je bedeutender die Geschwindigkeit der Flüssigkeit ist. Was das Gesetz betrifft, nach welchem der Widerstand mit der Geschwindigkeit zunimmt, so wird dieses am besten so ausgedrückt, dass man annimmt, dieser Widerstand sei gleich der Summe zweier Kräfte, von denen die eine proportional der Geschwindigkeit der Flüssigkeit und die andere proportional dem Quadrat dieser Geschwindigkeit ist. Wenn folglich die Geschwindigkeit doppelt, dreimal, viermal so gross wird als vorher, so wächst der Widerstand in einem rascheren Verhältniss als die Zahlen

2, 3, 4, aber in einem weniger raschen als die Quadrate 4, 9, 16 dieser Zahlen.

§. 356. Der Druck, welcher im Innern einer Flüssigkeit, die eine Röhre von überall gleichem Querschnitt mit gleichförmiger Geschwindigkeit durchfliesst, stattfindet, und den man gewöhnlich den hydraulischen Druck nennt, ändert sich im Allgemeinen von einem Querschnitt der Röhre zum anderen. Nach den Gleichgewichtsbedingungen, die wir oben für eine, zwischen zwei Querschnitten enthaltene Flüssigkeitsmasse aufgestellt haben, ist es nicht schwer, die Aenderungen dieses Druckes aufzufinden. Denken wir uns zunächst eine gerade horizontale Röhre BC (Fig. 489), durch welche die Flüssigkeit aus einem Gefäss A ausfliesst, so ist nach dem, was in §. 354 gesagt wurde, klar, dass der Druck in irgend einem Querschnitt E derselben gleich den gesammten Reibungswiderständen sein

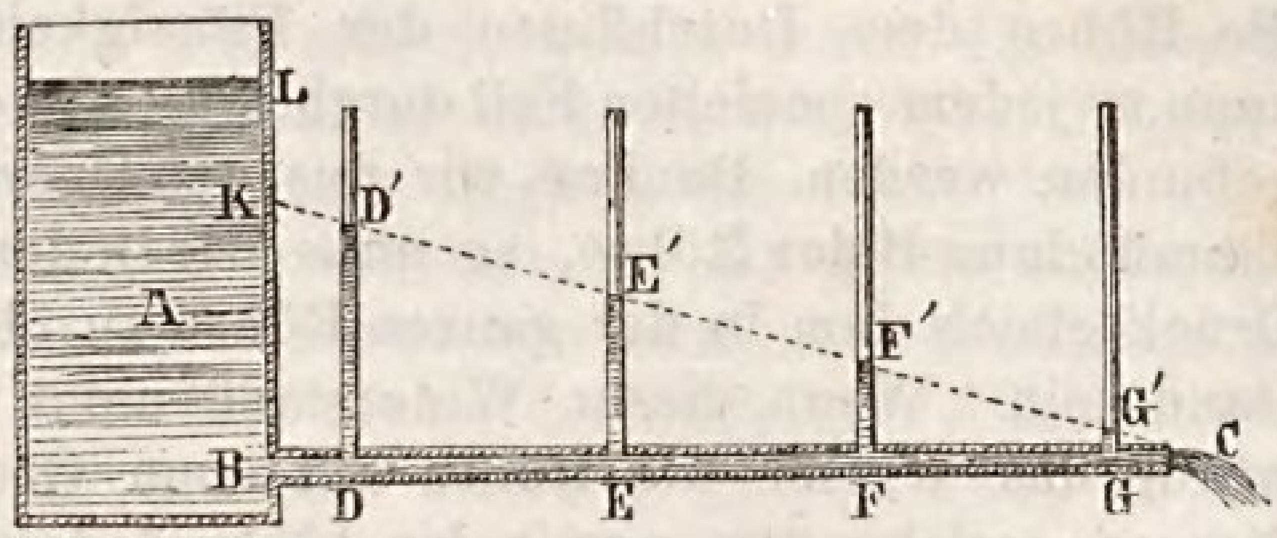


Fig. 489.

muss, welche die Flüssigkeit in dem Röhrenstück EC zu überwinden hat. Denn wenn man die zwischen den Querschnitten E und C enthaltene Flüssigkeitsmasse durch eine beliebige Anzahl von Querschnitten in kleine Stücke theilt, so müssen die Unterschiede der Drückungen an den beiden Begrenzungsquerschnitten jeder dieser Stücke gleich dem Widerstande sein, den dieses Stück zu überwinden hat; die erste von den drei in §. 354 behandelten Kräften ist im Falle einer horizontalen Röhre gleich Null. Nun ist der Druck im Querschnitt C am Ende der Röhre offenbar gleich Null (vom Drucke der atmosphärischen Luft, der mit gleicher Stärke am Ende der Röhre und auf den Spiegel im Gefäss ausgeübt wird und sich also selber aufhebt, können wir absehen), und von da an nimmt er von Querschnitt zu Querschnitt um die Grösse des Widerstandes, welcher zwischen den zwei aufeinander folgenden Querschnitten enthalten ist, zu; in E ist er also gleich dem Gesammtwiderstand, den die Flüssigkeit auf dem Wege EC zu erleiden hat. Da ferner, wie in §. 355 gezeigt wurde, bei gleicher Geschwindigkeit der Widertand, welcher sich einer Flüssigkeit beim Durchfluss durch verschieden lange Stücke einer und derselben Röhre entgegensetzt, der Länge dieser Stücke proportional ist, so folgt, dass die Unterschiede

der in den Querschnitten D, E, F, G stattfindenden hydraulischen Drückungen den zwischen diesen Querschnitten enthaltenen Röhrenstücken DE, EF, FG proportional sein müssen. Wenn man daher an den verschiedenen Stellen der Ausflussröhre, wo jene Querschnitte gemacht worden sind, vertikale Glasröhrchen befestigt, die den Zweck haben, durch die Höhen der Flüssigkeitssäulen, welche sich in ihnen erheben, den hydraulischen Druck an der betreffenden Stelle zu messen, so müssen die Spiegel D', E', F', G' der Flüssigkeit in diesen Röhrchen in einer Geraden liegen, die von dem Ende C der Röhre ausgeht und von da an aufwärts steigt. Die Neigung dieser geraden Linie gegen die Achse der Röhre muss offenbar um so stärker sein, je mehr Widerstand die Röhre dem Durchflusse der Flüssigkeit entgegensetzt; sie kann in jedem speciellen Fall durch folgende einfache Betrachtung gefunden werden. Denken wir uns den Querschnitt zunächst der Einmündung B der Röhre, so muss der in demselben stattfindende Druck gleich dem in der ganzen Röhre zu überwindenden Widerstand sein. Wenn dieser Widerstand nicht vorhanden wäre, so würde das Wasser die Röhre mit einer Geschwindigkeit durchfliessen, welche dem vertikalen Abstand der Einmündung B unter dem Spiegel im Gefäss als Druckhöhe entspricht (von den Geschwindigkeitsverlusten durch plötzliche Richtungsänderungen der Flüssigkeitssäulen bei ihrem Eintritte in die Röhre hier, wie auch in der Folge, abgesehen). Durch den Widerstand der Röhre aber wird diese Geschwindigkeit vermindert und entspricht also nur einer geringeren Druckhöhe; die Differenz zwischen dieser und der erstgenannten ist offenbar gleich dem Druck, der zur Ueberwindung der Widerstände in der Röhre verwendet wird. Die Höhe, bis zu welcher sich die Flüssigkeitssäule in einem Glasröhrchen zunächst der Einmündung B in das Ausflussrohr erheben würde, ist also gleich der Differenz zwischen dem vertikalen Abstand BL der Mündung B unter der Oberfläche der Flüssigkeit im Gefäss A und der Druckhöhe, welche der Geschwindigkeit der Flüssigkeit in der Röhre entspricht. Wenn man daher in B eine Vertikale BK, gleich dieser Differenz, errichtet, und deren Endpunkt K mit dem Ende C der Röhre verbindet, so erhält man die gerade Linie, in welcher die Flüssigkeitssäulen endigen, die sich in den bei D, E, F, G, angebrachten Glasröhrchen erheben und den hydraulischen Druck an diesen Stellen anzeigen.

Nehmen wir nun statt einer horizontalen eine aufwärts geneigte gerade Röhre BC (Fig. 490), durch welche das Wasser aus einem Gefäss A ausströmt; dann ist klar, dass der

hydraulische Druck in irgend einem Querschnitt E ausser den Widerständen, welche das Röhrenstück EC veranlasst, auch noch die zur Achse der Röhre parallele Componente des Gewichts

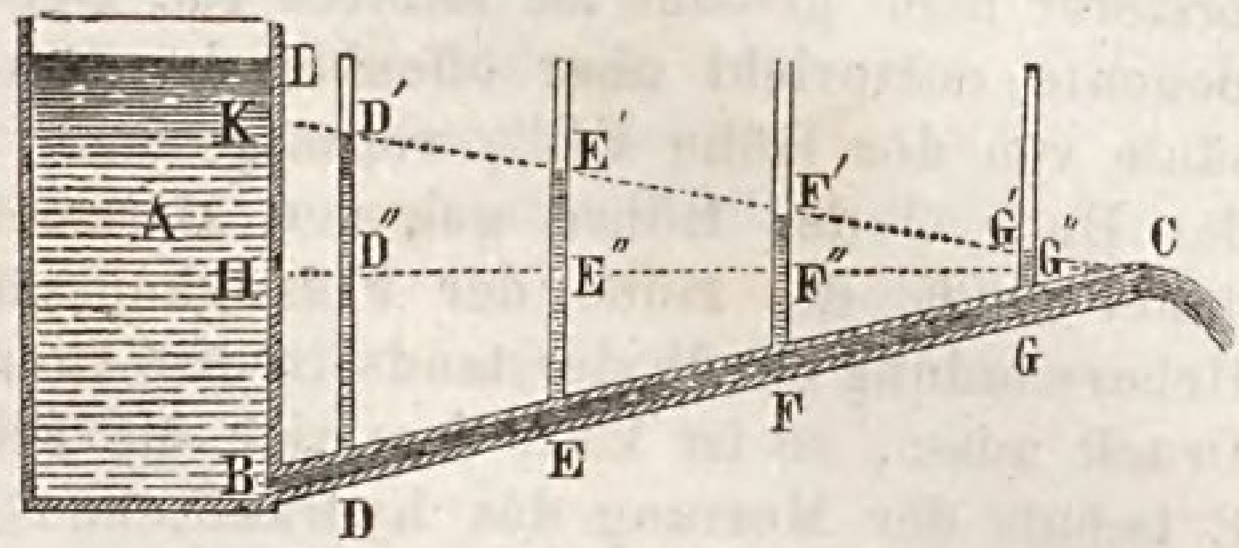


Fig. 490.

der in EC enthaltenen Flüssigkeitsmasse zu überwinden hat. Diese letztere Componente allein aber erfordert schon einen Druck, der einer Flüssigkeitssäule entspricht, die sich von E aus bis zur Horizontalen CH erhebt, welche durch das Ende C der Ausflussröhre gezogen gedacht wird. In einem bei E angebrachten Glasröhrchen muss sich folglich die Flüssigkeit noch so weit über diese Horizontale erheben, als die Widerstände, die in dem Röhrenstück EC zu überwinden sind, erfordern. Daraus folgt nun klar, dass auch hier wieder die Enden der Flüssigkeitssäulen, welche sich in den zur Messung des Druckes in den Querschnitten D, E, F, G angebrachten Glasröhrchen erheben, in einer Geraden CK gelegen sein müssen, welche erhalten wird, wenn man die Höhe HK gleich der Differenz zwischen dem vertikalen Abstand HL des Endes C der Röhre unter dem Spiegel der Flüssigkeit im Gefäss und der Druckhöhe, welche der Geschwindigkeit der Flüssigkeit in der Röhre entspricht, macht.

Wenn die Ausflussröhre, die wir immer noch als gerade voraussetzen, abwärts geneigt ist (Fig. 491), so wirkt die zur Röhrenachse parallele Componente des Gewichts der Flüssigkeitsmasse, welche zwischen zwei Querschnitten enthalten ist, im Sinne der Bewegung. Der in irgend einem Querschnitt E stattfindende hydraulische Druck ist folglich nur noch gleich dem Unterschied

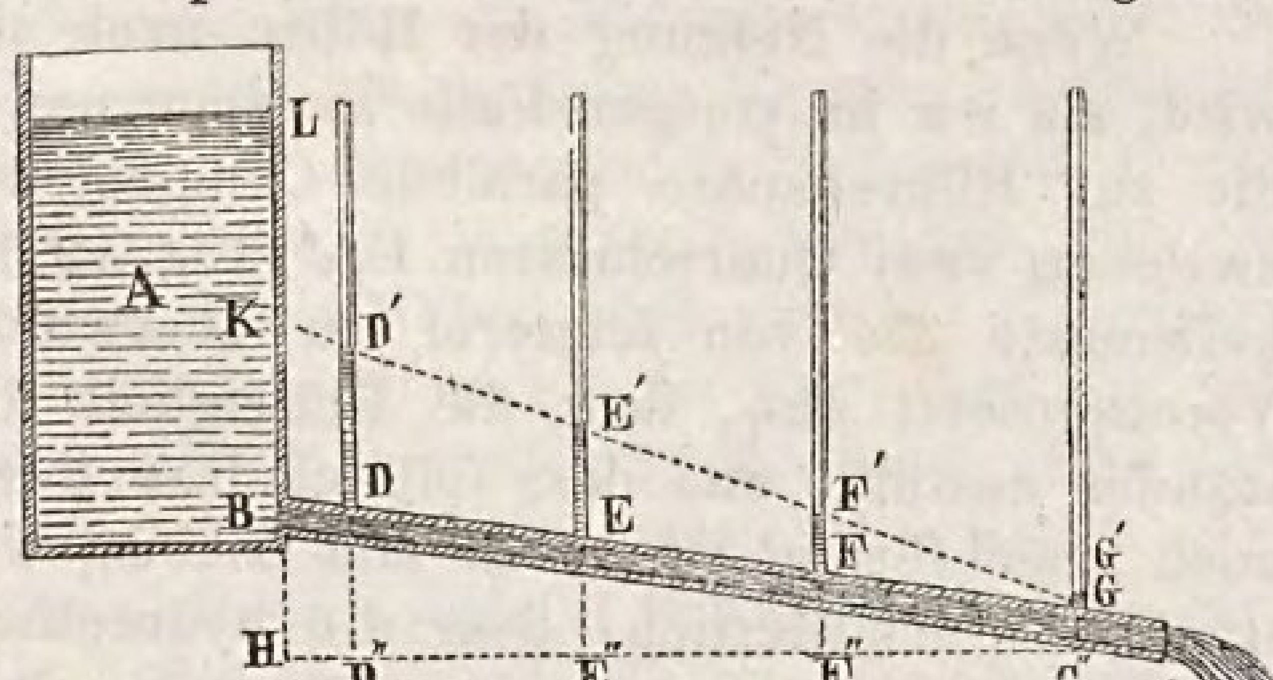


Fig. 491.

zwischen dem in dem Röhrenstück EC stattfindenden Widerstand und der zur Achse der Röhre parallelen Componente des Gewichts des Flüssigkeitsstücks EC, wobei wir zunächst voraussetzen, dass

ersterer noch grösser als letztere sei. Der Wirkung jener Componente entspricht aber offenbar der Druck einer Flüssigkeitssäule von der Höhe EE″, vorausgesetzt, dass E″ in der durch das Ende C der Röhre gelegten Horizontalen CH liegt. Stellt daher E″E′ die Höhe der Flüssigkeitssäule vor, die den zur Ueberwindung des Widerstands in dem Röhrenstück E C nöthigen Druck misst, so ist klar, dass sich die Flüssigkeit in einem bei E behufs der Messung des hydraulischen Druckes angebrachten Glasröhrchen bis E′ erheben muss, dass folglich die Flüssigkeitssäule E E′ diesen hydraulischen Druck misst. Ebenso ist klar, dass in den sämmtlichen Glasröhrchen, die in den Querschnitten D, E, F, G behufs der Messung des hydraulischen Druckes eingesetzt werden, die Flüssigkeitsspiegel in einer Geraden C K liegen, die gefunden wird, indem man die Höhe HK gleich dem Unterschied zwischen dem vertikalen Abstand HL des Endes C der Röhre unter dem Spiegel im Gefäss und der Druckhöhe, welche der Geschwindigkeit der Flüssigkeit in der Röhre entspricht, macht.

Es ist nicht schwer einzusehen, dass man der Röhre B C eine solche Neigung geben kann, dass die zur Röhrenachse parallele Componente des Gewichts einer zwischen irgend zwei Querschnitten enthaltenen Flüssigkeitsmasse gerade gleich ist dem Widerstand, welchen das zwischen den beiden Querschnitten gelegene Röhrenstück darbietet. In diesem Falle müssen die Drückungen in den beiden Begrenzungsquerschnitten der betrachteten Flüssigkeitsmasse einander gleich und, wie man leicht sieht, gleich Null werden. Die Linie CK (Fig. 491) fällt mit der Röhrenachse CB zusammen und die Flüssigkeit übt längs der ganzen Röhre keinen hydraulischen Druck aus.

Wenn die Neigung der Röhre nach abwärts noch grösser wird, als wir im vorigen Falle angenommen haben, so überwiegt die zur Röhrenachse parallele Componente des Gewichts der zwischen zwei Querschnitten E, *e* (Fig. 492) enthaltenen Flüssigkeitsmasse die von letzterer zu überwindenden Widerstände. Vorausgesetzt also, dass die Flüssigkeit die Röhre noch vollständig ausfüllt, und dass folglich ihre Bewegung in derselben noch gleichförmig ist, so ist zum Gleichgewicht des Flüssigkeitsstücks E *e* erforderlich, dass die hydraulischen Drückungen in den Begrenzungsquerschnitten E, *e* eine Resultante geben, die der Richtung der Bewegung entgegengesetzt ist. Daraus würde folgen, dass der an dem vorderen Querschnitte *e* stattfindende Druck immer grösser als der an dem hinteren E wirkende sein, dass folglich der hydraulische Druck nach dem Ende C der Röhre

zu wachsen und an diesem Ende selbst am grössten sein müsste. Nun ist er aber bei C gleich Null und dies sagt uns, dass die Kräfte, welche in den Begrenzungsquerschnitten E, e eines Flüssigkeitsstücks wirken, die entgegengesetzte Richtung wie bisher, die von C nach B, haben und von C angefangen, wo sie gleich Null sind, gegen B hin stetig wachsen. In gleicher Weise verwandeln sich die Drückungen, welche die Flüssigkeit gegen die Wände der Röhre ausübt, in Zugkräfte, d. h. in Kräfte, mit denen sich die mit der Wand in Berührung stehenden Moleküle von derselben zu entfernen streben und sich auch wirklich entfernen würden, wenn sie nicht von der Adhäsion zwischen der Flüssigkeit und den Röhrenwänden daran verhindert würden. Daraus geht, wie man leicht sieht, hervor, dass jedes solche zwischen zwei Querschnitten enthaltene Flüssigkeitsstück, wie E e, seine Länge zu vergrössern und dagegen seinen Querschnitt zu verkleinern sucht (s. die Nebenfigur bei 492) und dies wirklich thun würde, wenn es nicht durch seine Adhäsion an den Wänden, die wir mit der Voraussetzung, dass die Flüssigkeit die Röhre noch vollständig erfüllt, als hinreichend gross angenommen haben, daran verhindert würde. So kann die Flüssigkeit nur eine Art von Saugen an den Röhrenwänden ausüben, das man anschaulich machen kann, indem man in irgend einem Querschnitt E eine gebogene, nach abwärts gehende Glasröhre befestigt, die mit Flüssigkeit gefüllt ist. In dieser Röhre wird sich die Flüssigkeit so stellen, wie es die Figur angibt, und es ist klar, dass der vertikale Abstand des Spiegels E′ im offenen Schenkel unter dem Querschnitt E, den wir kurz mit E E′ bezeichnen wollen, den Zug, der in diesem Querschnitt ausgeübt wird, misst. Nun wird die Wirkung der zur Röhrenachse parallelen Componente des Gewichts der in E C enthaltenen Flüssigkeitsmasse offenbar durch den Druck einer Flüssigkeitssäule von der Höhe E E″ ausgedrückt, vorausgesetzt, dass E E″ in der durch das Ende C der Röhre gelegten Horizontalen C H liegt. Nach dem, was oben

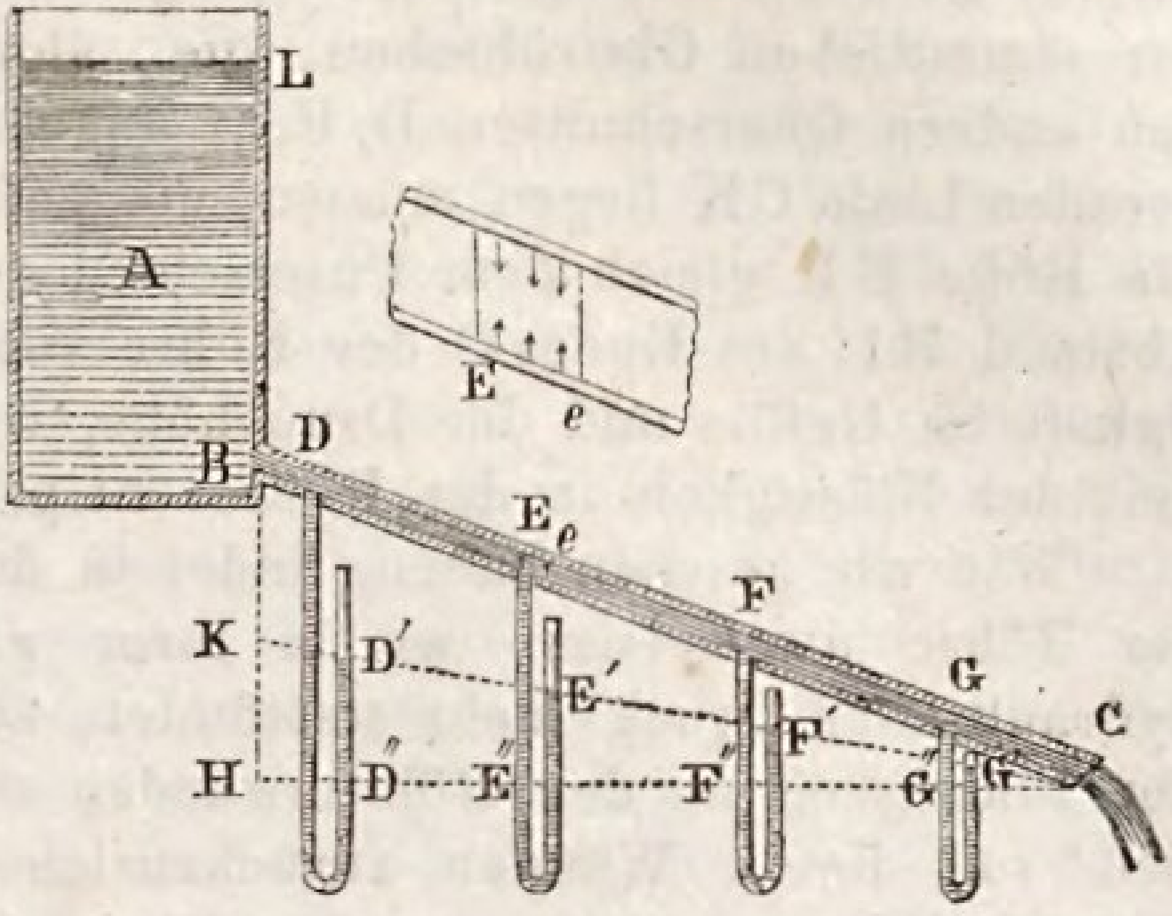


Fig. 492.

bereits über das Gleichgewicht einer zwischen zwei Querschnitten gelegenen Flüssigkeitsmasse gesagt wurde, muss folglich E″E′ die Höhe einer Flüssigkeitssäule sein, durch welche der in dem Röhrenstück EC zu überwindende Widerstand ausgedrückt wird. Daraus geht hervor, dass der Spiegel in den offenen Schenkeln der sämmtlichen Glasröhrchen, die, ähnlich wie in E, auch in den andern Querschnitten D, F, G angebracht werden, in einer geraden Linie CK liegen müssen, die gefunden wird, indem man die Höhe HK gleich dem Unterschied zwischen dem vertikalen Abstand HL des Endes C der Röhre von dem Spiegel der Flüssigkeit im Gefäss und der Druckhöhe, welche der Geschwindigkeit der Flüssigkeit in der Röhre entspricht, macht.

Wie wir gesehen haben, findet in dem Fall, wo die Neigung der Röhre die Grenze, wo in ihrer ganzen Ausdehnung kein hydraulischer Druck mehr stattfindet, überschreitet, ein Saugen der Flüssigkeit an den Röhrenwänden statt, in Folge dessen sie sich von diesen Wänden zurückzuziehen und einen kleineren Querschnitt anzunehmen sucht. Dieser Zug ist an irgend einer Stelle E (Fig. 492) gleich der Differenz zwischen der zur Röhrenachse parallelen Componente des Gewichts der Flüssigkeitsmasse, die in dem Röhrenstück EC enthalten ist, und dem Widerstand, welchen dieser Röhrentheil der Bewegung entgegensetzt. So lange die Neigung der Röhre noch nicht bedeutend und also jene Componente noch nicht gross genug ist, widersteht die Adhäsion zwischen der Flüssigkeit und den Wänden der Röhre dem Bestreben der ersteren, sich von den letzteren zu entfernen. Aber wenn die Neigung der Röhre zu sehr wächst, so ist klar, dass der Fall eintreten kann, wo jener Zug die Adhäsion überwindet; dann füllt die Flüssigkeit die Röhre nicht mehr aus, und die Moleküle des Strahls bewegen sich mit beschleunigter Bewegung unter ähnlichen Umständen, wie wir sie im §. 338 speciell für einen vertikalen Strahl entwickelt haben. Es ist klar, dass dieser Fall bei weiteren Röhren eher eintreten muss als bei engeren, denn bei Vergrösserung des Durchmessers einer Röhre vergrössert sich die innere Oberfläche eines Stückes derselben von bestimmter Länge, und damit einerseits die Widerstände, welche dasselbe darbietet, und andererseits die Adhäsion in einfachem Verhältniss, während das Gewicht der dieses Stück ausfüllenden Flüssigkeit im quadratischen Verhältniss zunimmt.

Wir haben bisher blos gerade Röhren betrachtet. Die Anwendung der erhaltenen Resultate auf gebogene Röhren, vorausgesetzt, dass rasche Krümmungen vermieden sind, ist leicht.

§. 357. Wirkungen der Kniee und der Verengungen. Es kommt häufig vor, dass die Röhren, welche zur Leitung von Flüssigkeiten bestimmt sind, in den Punkten, wo sie ihre Richtung ändern, mit sog. Knieen versehen sind. Diese Kniee, ähnlich denjenigen bei den Ofenrohren, stellen der Bewegung der Flüssigkeit, welche sie durchlaufen muss, immer einen grossen Widerstand entgegen. In dem Moment, wo die Flüssigkeitsfäden in einem solchen Knie ankommen, müssen sie ihre Richtung plötzlich ändern; dieser plötzliche Wechsel in der Richtung der Geschwindigkeit der Moleküle zieht aber stets einen Verlust an Arbeit nach sich, wie wir das auch schon bei Gelegenheit der Wirkung der cylindrischen Ansatzröhrchen beobachtet haben (§. 340). Um daher die Geschwindigkeit der Bewegung einer Flüssigkeit in einer Röhre, welche Kniee enthält, auf einer gegebenen Grösse zu erhalten, muss man eine grössere Menge von Arbeit aufbieten, als wenn diese Krümmungen nicht existirten. Wo also eine Aenderung in der Richtung der Röhre, durch welche eine Flüssigkeit fliesst, nothwendig ist, da wird man, um Arbeitsverluste möglichst zu beseitigen, dafür sorgen, dass die Aenderung in der Richtung der Flüssigkeitsfäden nur allmählich vor sich geht; man wird zu dem Ende zwei Röhrentheile, deren Richtungen verschieden sind, nicht durch ein Knie, sondern durch eine gebogene Röhre mit einander verbinden, deren Krümmung nicht zu gross ist. Indem man auf solche Weise den Weg, welchen eine Flüssigkeit zu durchlaufen hat, möglichst abrundet, kann man die Widerstände, welche sich ihrer Bewegung entgegensetzen, so verringern, dass sie nahezu nur noch ebenso gross sind als in dem Fall, wo die Röhre ihrer ganzen Länge nach die nämliche Richtung hat.

Wenn die Röhre, in welcher eine Flüssigkeit fliesst, inwendig eine plötzliche Verengung darbietet, so ist der Durchgang der Flüssigkeit durch diese Verengung von einem Arbeitsverlust begleitet, welcher ebenfalls aus den plötzlichen Aenderungen entspringt, welche die Geschwindigkeit der Moleküle erfährt; nur betreffen diese Aenderungen hier mehr die Grösse der Geschwindigkeit als ihre Richtung. Der Widerstand, welchen eine Verengung der Röhre stets hervorruft, würde viel geringer sein, wenn diese Verengung nur nach und nach einträte, sodass die Geschwindigkeit der Flüssigkeitsmoleküle nur allmählich verändert würde; denn diese Geschwindigkeit muss ja um so grösser werden, je kleiner der Querschnitt ist, wo sich jene Moleküle befinden. Nichtsdestoweniger müssen die Verengungen, selbst

wenn sie nur ganz allmählich auftreten, allemal eine Vergrösserung der Widerstände hervorbringen; denn einerseits nimmt die Flüssigkeit darin eine grössere Geschwindigkeit an als in dem übrigen Theil der Röhre, andererseits berührt eine und dieselbe Flüssigkeitsmasse die Wände in einer um so grösseren Oberfläche, je kleiner der Durchmesser der Röhre wird; aus diesem doppelten Grunde also wird die Reibung, welche die Flüssigkeit in einer Röhre erfährt (§. 355), durch die Gegenwart von Verengungen vermehrt. Man sieht daraus, dass man es sorgfältig vermeiden muss, Flüssigkeiten durch enge Durchgänge fliessen zu lassen; wenn dies aber nicht zu umgehen ist, so muss man wenigstens den Wänden der Röhre an der betreffenden Stelle eine solche Gestalt geben, dass sie nur allmählich die Aenderung in der Geschwindigkeit der Flüssigkeitsmoleküle, welche die Verengung zu durchfliessen haben, hervorbringt.

§. 358. Wir haben oben (§. 181) gesagt, dass es in gewissen Ausnahmsfällen nöthig wird, die Wirkung der passiven Widerstände, welche sich bei der Bewegung entwickeln, zu vermehren, um die Geschwindigkeit der sich bewegenden Körper zu moderiren. Wenn es sich um eine Flüssigkeit, welche in einer Röhre fliesst, handelt, so erreicht man diesen Zweck, indem man sie nöthigt, durch eine mehr oder weniger bedeutende Verengung hindurch zu gehen. Zu diesem Behufe bringt man in der Röhre einen Hahn an, der so eingerichtet ist, dass seine Oeffnung, wenn er die passende Stellung hat, nur einen Theil des Innern der Röhre bildet, und dass folglich die Bewegung der Flüssigkeit, indem sie diesen Hahn durchdringt, genau so ist, als wenn dieser gar nicht vorhanden wäre. Wenn man alsdann die Bewegung der Flüssigkeit mässigen will, so darf man nur den Hahn etwas drehen (Fig. 493). Seine Oeffnung trifft dann nicht mehr mit den benachbarten Theilen der Röhre zusammen, und daraus folgt eine plötzliche Verengung, welche eine Verringerung der Geschwindigkeit der Flüssigkeitsmoleküle hervorbringt. Die auf diese Weise erzielte Wirkung wird um so bedeutender sein, je mehr der Hahn gedreht wird.

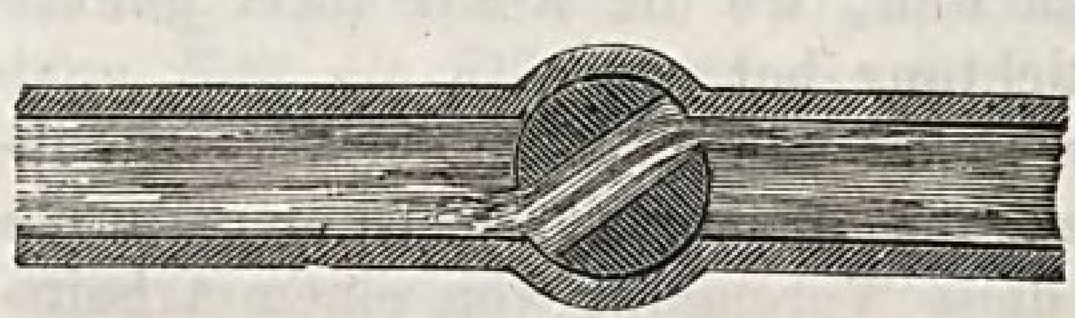
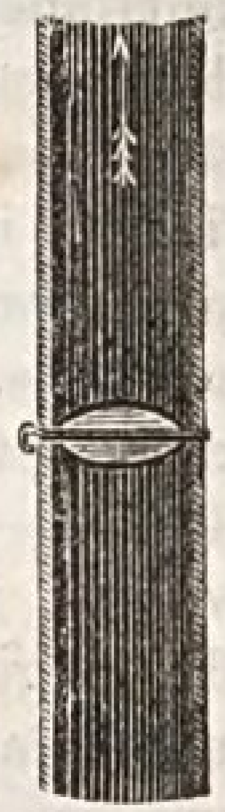


Fig. 493.

Um denselben Zweck zu erreichen, kann man auch noch ein anderes Mittel anwenden, das darin besteht, dass man in der Röhre eine sog. Drosselklappe anbringt. Diese Klappe ist nichts anderes als eine kreisrunde Scheibe, welche an einer Achse so

befestigt ist, dass dieselbe, indem sie quer durch die Röhre hindurchgeht, mit einem der Durchmesser der Scheibe zusammenfällt. Indem man diese Achse um sich selber dreht, bewegt man zu gleicher Zeit die Scheibe, welcher man auf diese Weise die verschiedensten Stellungen im Innern der Röhre geben kann. Wenn man diese Scheibe so stellt, dass ihre Ebene senkrecht auf der Achse der Röhre steht, so legt sie sich in ihrem ganzen Umfang an die Wände der Röhre an und verschliesst so vollständig den Durchgang durch die Röhre. Wenn im Gegentheil die Ebene der Scheibe dieselbe Richtung wie die Achse der Röhre hat, so bietet sie der bewegten Flüssigkeit nur ihren Querschnitt dar, und diese kann auf beiden Seiten frei vorbeifliessen; in diesem Fall verengt die Scheibe den Raum, welcher für den Durchfluss der Flüssigkeit gelassen ist, nur unbedeutend. Indem man folglich der Scheibe Stellungen gibt, welche zwischen den beiden äussersten, von denen wir eben gesprochen haben, gelegen sind, kann man eine grössere oder geringere Verengung und dadurch eine entsprechende Verminderung der Geschwindigkeit hervorbringen. Ein Beispiel für diese Drosselklappe hat man in den Klappen der Rauchrohre (Fig. 494), deren man sich bedient, um die aufsteigende Bewegung des Rauches in diesen Rohren zu verringern.


Fig. 494.

Endlich bringen auch Ventile, Schieber u. dgl. Verengungen in den Röhren und Kanälen, in welchen sie angebracht sind, hervor, durch welche die Bewegung der darin fliessenden Flüssigkeiten verzögert wird.

§. 359. **Springbrunnen.** — Wir haben gesagt (§. 336), dass in dem Fall, wo sich eine Flüssigkeit durch eine Oeffnung ergiesst, welche so angebracht ist, dass ein vertikal von unten nach oben gerichteter Strahl hervorspringt, dieser Strahl nahezu bis zur Höhe des Spiegels der Flüssigkeit im Reservoir emporsteigt. Auf diesem Gesetze beruhen die Springbrunnen. Das Wasser, welches in einem höher gelegenen Behälter enthalten ist, wird durch eine Röhre herabgeleitet, welche sich unten horizontal umbiegt, unter der Erde fortgeht und sich in eine nach oben gerichtete Oeffnung endigt.

Die Röhre, durch welche das Wasser von dem Reservoir bis zur Oeffnung geführt wird, hat oft eine sehr bedeutende Länge und veranlasst in Folge dessen Reibungen, welche die Bewegung des Wassers verzögern, und durch welche die Höhe des aufspringenden Strahls bedeutend vermindert wird. Damit

diese Widerstände, welche das Wasser erfährt, nicht zu bedeutend werden, ist es wichtig, der Leitungsröhre einen hinreichend grossen Querschnitt zu geben; dadurch vermindert man einerseits die Geschwindigkeit des Wassers in der Röhre und andererseits die Grösse der Wandfläche, welche von einer und derselben Flüssigkeitsmasse berührt wird (§. 355). Gewöhnlich wählt man den Durchmesser der Röhre von der Grösse, dass die Geschwindigkeit des Wassers in ihr 2 oder 3 Decimeter in der Secunde nicht übersteigt.

Wenn die Ausflussöffnung mit einem Ansatzröhrchen versehen ist, so bringt dasselbe, indem es die Richtung der Flüssigkeitsfäden plötzlich abändert, eine sehr bedeutende Verminderung der Sprunghöhe des Strahls hervor. Ein cylindrisches Ansatzröhrchen z. B. vermindert die Ausflussgeschwindigkeit einer Flüssigkeit in dem Verhältniss von 1 zu 0,82 (§. 340); die Höhe, bis zu welcher sich die Flüssigkeit in Folge ihrer Geschwindigkeit, die sie beim Austritt aus dem Ansatzröhrchen besitzt, erheben kann, ist folglich nur 0,67 (0,67 gleich $0,82 \times 0,82$) oder ungefähr $^3/_4$ von derjenigen, zu welcher die Flüssigkeit emporsteigen würde, wenn die Oeffnung in dünner Wand angebracht wäre. Um folglich die Sprunghöhe des Strahls nicht zu beeinträchtigen, muss man die Oeffnung in einer Platte von geringer Dicke anbringen, oder auch eine abgerundete Oeffnung construiren (§. 342). Die erstere dieser Einrichtungen ist der zweiten in Rücksicht auf die Schönheit und Klarheit des Strahls, welche durch die Adhäsion der Flüssigkeitsfäden an den Wänden der abgerundeten Oeffnung beeinträchtigt werden, vorzuziehen.

Die Höhe, bis zu welcher der Strahl empor springt, wird ausserdem noch durch den Widerstand der Luft, sowie auch durch die Wassertheile vermindert, welche, nachdem sie die grösste Höhe, bis zu welcher sie sich erheben können, erreicht haben, auf den aufsteigenden Strahl zurückfallen und dadurch einen Theil der Geschwindigkeit der Moleküle, aus denen derselbe besteht, vernichtet. Dies letztere ist der Grund, warum durch eine geringe Neigung des Strahls die Sprunghöhe desselben vermehrt wird.

Häufig bringt man an dem Ende der Leitungsröhre, welche das Wasser vom Reservoir her zuführt, mehrere Oeffnungen neben einander an. Diese Oeffnungen sind dann meist in den verschiedenen Punkten einer, wie ein Kugelabschnitt gestalteten Wand angebracht, wodurch Strahlen von verschiedenen Richtungen hervorgebracht werden, welche eine sog. Garbe bilden. Der Strahl, welcher der mittleren Oeffnung entspricht, ist vertikal

gerichtet; die anderen, welche sich regelmässig um diesen reihen, haben an der Oeffnung, aus welcher sie entspringen, eine mehr oder weniger schiefe Richtung, je nachdem der Theil der Wand, in welchem die Oeffnung angebracht ist, mehr oder weniger gegen den Horizont geneigt ist. Die Geschwindigkeit, mit welcher das Wasser aus den verschiedenen Oeffnungen tritt, ist für alle diese Oeffnungen dieselbe; die geneigten Strahlen, welche daraus hervorspringen, nehmen also die Gestalt von Parabeln an, welche sämmtlich einer und derselben Wurfgeschwindigkeit entsprechen (§. 141). Die horizontale Sprungweite eines Strahls hängt folglich nur von der Richtung ab, in welcher derselbe aus seiner Oeffnung tritt; die grösste Sprungweite kommt dem zu, dessen ursprüngliche Richtung einen Winkel von 45^0 mit dem Horizont macht, und diese Sprungweite ist doppelt so gross als die Höhe, bis zu welcher sich der mittelste Strahl vertikal erhebt.

§. 360. **Artesische Brunnen.** — Im Innern der Erde, in mehr oder weniger grosser Tiefe unter der Oberfläche derselben, gibt es natürliche Wasserbehälter, die oft eine sehr grosse Ausdehnung haben. Gewöhnlich ist das Wasser in demselben in Bewegung und bildet so einen wirklichen unterirdischen Strom. Wenn man an solchen Stellen ein Bohrloch eintreibt, das tief genug ist, um das Reservoir zu erreichen, so erhebt sich die Flüssigkeit in demselben, gewöhnlich bis zu seiner Mündung, und häufig wird sogar noch ein vertikal aufsteigender Strahl erzeugt, der sich in mehr oder weniger grosser Höhe über die Oberfläche der Erde erhebt. Brunnen dieser Art nennt man artesische Brunnen; dieser Name rührt von der ehemaligen Grafschaft Artois in Frankreich her, wo sie in der neueren Zeit zum erstenmal gebohrt wurden; doch ist kein Zweifel, dass sie bereits im Alterthum bekannt waren; man hat solche Brunnen in den ägyptischen Oasen gefunden, deren Gründung sicher bis zu einer sehr frühen Epoche hinaufreicht.

Um sich über die Erscheinungen, welche man bei den artesischen Brunnen beobachtet, vollständig Rechenschaft zu geben, muss man sich erinnern, dass die Erdrinde in der Nähe ihrer Oberfläche im Allgemeinen von einer grossen Anzahl von übereinander lagernden Schichten gebildet wird. Diese Schichten, die sehr verschiedener Natur sind, haben oft eine sehr grosse Ausdehnung. Ihre Dicke, ohne gerade durchweg gleich zu bleiben, zeigt doch eine grosse Regelmässigkeit. Die verschiedenen Schichten, welche auf diese Weise übereinander gelagert sind, werden also durch Flächen von einander getrennt, welche man als nahezu

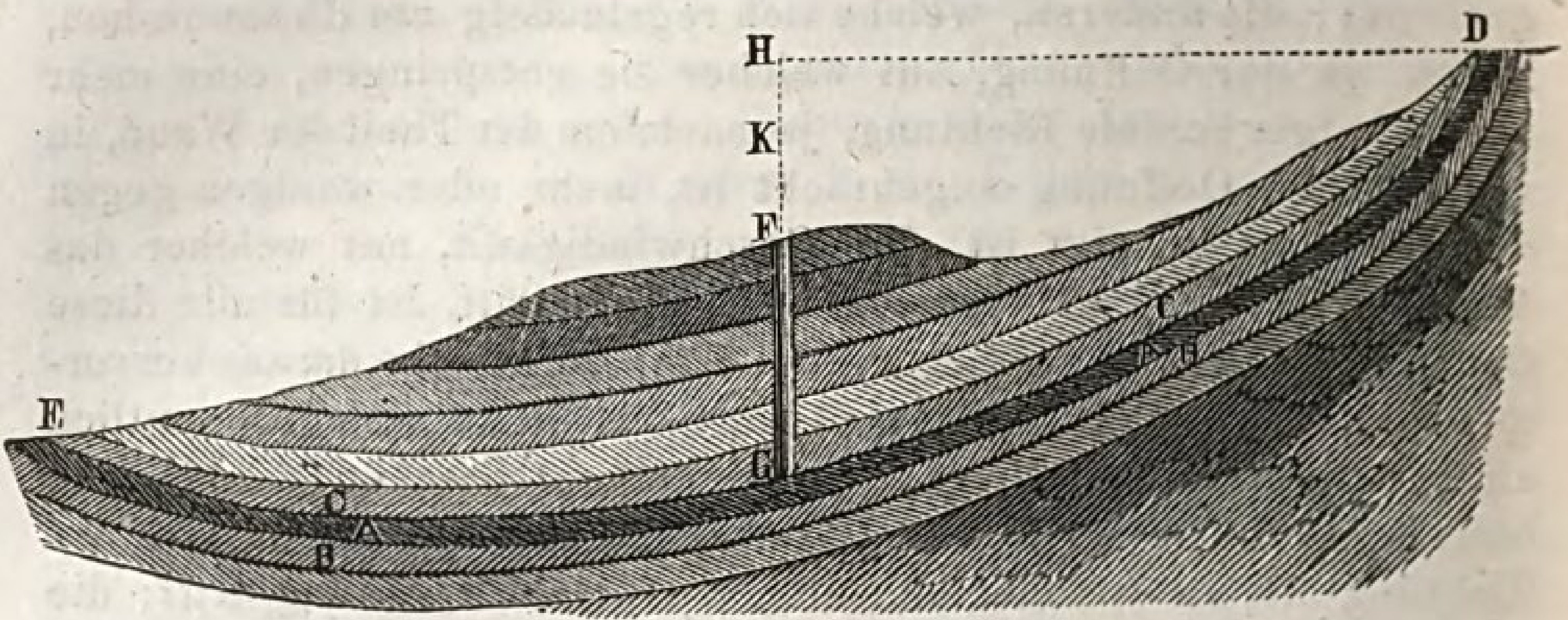


Fig. 495.

parallel unter sich betrachten kann. Aber diese Trennungsflächen, welche zur Zeit der Bildung der Schichten eine horizontale Lage gehabt haben mögen, haben in Folge der geologischen Bewegungen, welche diese Schichten in der Folge erfahren mussten, Gestaltsveränderungen erlitten; die Folge davon ist, dass in Wirklichkeit die Schichten gewöhnlich geneigt sind, und dass sich diese Neigung von einem ihrer Punkte zum anderen ändert.

Denken wir uns nun, dass an einem Ort das Erdreich von solchen übereinander gelagerten Schichten (Fig. 495), von denen wir eben gesprochen haben, gebildet werde, und dass sich unter diesen Schichten eine, AA, befinde, in welcher sich das Wasser leicht bewegen kann; diese Schichte kann z. B. aus Sand oder überhaupt aus Material bestehen, das zahlreiche Ritzen und Spalten darbietet. Nehmen wir ferner an, dass diese Schichte zwischen zwei anderen, BB, CC, enthalten sei, welche das Wasser nur schwer, oder noch besser, gar nicht durchdringen lassen. Wenn eine gewisse Menge Wasser in die Schichte AA eindringt, so bewegt es sich in den Zwischenräumen dieser sog. wasserführenden Schichte fort, ohne weder an der oberen noch an der unteren Seite derselben austreten zu können; es wird durch die Gegenwart der beiden undurchdringlichen Schichten BB und CC, welche gleichsam zwei undurchdringliche Wände bilden, in der Schichte AA zurückgehalten.

Die Punkte, wo die Schichte AA endigt, liegen gewöhnlich an der Oberfläche der Erde; wenn dies der Fall ist, so sagt man, die Schichte streiche in diesen Punkten zu Tag. Das Wasser, welches sich auf der Erdoberfläche befindet, wie z. B. das Regenwasser oder auch wohl das Wasser der Bäche und Flüsse, kann folglich in die Schichte AA durch jene Punkte eindringen, sodass dieselbe für gewöhnlich mit Wasser gefüllt sein wird. Wenn

die sämmtlichen Punkte, in welchen die wasserführende Schichte zu Tag streicht, genau in der nämlichen Horizontalebene gelegen wären, so würde sich das in dieser Schichte befindliche Wasser im Gleichgewicht befinden und ruhig in derselben stehen bleiben. Aber dieser Fall tritt niemals ein: es gibt unter den Punkten, in denen eine Schichte zu Tage streicht, immer solche, welche höher als die anderen gelegen sind. Wenn man sich nun denkt, dass das Wasser von aussen durch diese höher gelegenen Punkte in die Schichte eintritt, so kann es sich nicht im Gleichgewicht halten und tritt nothwendig bei den tiefer gelegenen Punkten, in welchen die Schichte zu Tage streicht, wieder aus; es wird folglich im Innern der Schichte ein continuirlicher Strom hervorgebracht; das Wasser tritt auf der einen Seite ein und auf der anderen wieder aus.

Es sei D (Fig. 495) der Eintrittspunkt des Wassers in die wasserführende Schichte und E die Stelle, wo es wieder austritt. Wenn man nun an dem Orte F der Erdoberfläche ein vertikales Bohrloch FG bis zur Schichte AA hinab eintreibt, so wird das in dieser Schichte sich bewegende Wasser in demselben emporsteigen, und es kann selbst über die Oeffnung F sich erheben und bis zu grösserer oder geringerer Höhe emporspringen. Setzen wir zunächst voraus, dass man an der Mündung F des Bohrloches eine vertikale Röhre von solcher Höhe angebracht habe, dass das Wasser in derselben stehen bleiben muss, ohne oben ausfliessen zu können. Wenn sich alle Punkte, in denen die Schichte AA zu Tage streicht, im Niveau des Eintrittspunkts D befänden, so müsste das Wasser in dieser Röhre nach dem Gesetz der communicirenden Gefässe bis zu einem Punkte H, der gleichfalls mit D in einer Horizontalebene liegt, emporsteigen. Aber wenn das Wasser bei dem Punkte D ein- und bei dem tiefer gelegenen Punkte E austritt, so kann es sich in der Röhre nicht bis zum Punkte H erheben; seine freie Oberfläche wird in einem Punkte K, unterhalb des Punktes D und über dem Punkte E gelegen, stehen bleiben. Das Bohrloch FG und die Röhre, welche über der Mündung desselben angebracht ist, spielen hier im Verhältniss zu der wasserführenden Schichte, in welcher sich die Flüssigkeit bewegt, dieselbe Rolle wie die in den Punkten D, E, F, G der Ausflussröhre AB (Fig. 491, S. 707) angebrachten Glasröhrchen. Man sieht daraus, dass der Punkt K (Fig. 495), welchen man gewöhnlich das Gleichgewichtsniveau des artesischen Brunnens FG nennt, um so tiefer liegt, je näher der Brunnen dem Ausgangspunkt E des unterirdischen Stroms gelegen ist. Es kann

also, wie man das in der That auch öfter beobachtet hat, das Gleichgewichtsniveau von artesischen Brunnen, die wenig entfernt von einander sind und in derselben wasserführenden Schichte endigen, ein sehr verschiedenes sein.

Vorausgesetzt, dass das Gleichgewichtsniveau des Brunnens FG immer noch in K gelegen sei, so wird, wenn man an der Mündung F keine Röhre anbringt, das Wasser aus dieser Mündung hervorspringen; aber es wird sich dabei nicht bis zu dem Punkte K erheben. Damit das Wasser bis zu seinem Gleichgewichtsniveau emporspringen könnte, dürfte sich seiner Bewegung, welche es unter der Wirkung des Druckes, den es an dem unteren Ende des Bohrloches erfährt, anzunehmen sucht, kein Hinderniss entgegensetzen. Aber dies ist niemals der Fall; indem das Wasser in dem Bohrloch, welches gewöhnlich eng und sehr tief ist, emporsteigt, entwickelt es eine Reibung, welche seine Bewegung verzögert und in Folge deren seine Geschwindigkeit bedeutend unter die herabgedrückt wird, welche es ohne diese Reibung annehmen würde.

Wenn man an der Mündung des Bohrloches eine Röhre anbringt, welche sich nicht ganz bis zum Gleichgewichtsniveau K erhebt, so steigt das Wasser in dieser Röhre in die Höhe und fliesst an ihrer oberen Oeffnung aus. Die Ausflussgeschwindigkeit daselbst wird aber um so kleiner werden, je mehr sich das obere Ende der Röhre dem Punkte K nähert. Die Quantität des durch den artesischen Brunnen gelieferten Wassers vermindert sich also in dem Maasse, als man es mittelst einer solchen Röhre auf eine grössere Höhe steigen zu machen sucht; und diese Quantität wird ganz Null, wenn man es bis zum Gleichgewichts-Niveau selbst heraufsteigen lassen wollte.

Die Bohrlöcher der artesischen Brunnen haben meist nur einen Durchmesser von einigen Decimetern; ihre Tiefe ist dagegen manchmal sehr gross. Man bohrt diese Löcher mittelst Meiseln oder Bohrern von verschiedener Form, welche entweder an dem Ende eines Eisenstabs, den man nach Belieben verlängern oder verkürzen kann, oder auch einfach an dem Ende eines Seiles angebracht sind. Die Bohrlöcher müssen gewöhnlich in einem grossen Theil ihrer Tiefe, wo nicht in der ganzen, mit einer Futterröhre versehen werden, welche dazu bestimmt ist, das Einstürzen ihrer Wände zu verhüten. Als ein interessantes Beispiel eines artesischen Brunnens möge hier derjenige erwähnt werden, den die Stadt Paris in dem Schlachthaus von Grenelle bauen liess; er hat eine Tiefe von 546 Meter und sein Wasser

erhebt sich in einer Röhre bis in eine Höhe von 37 Meter über die Oberfläche der Erde; er liefert täglich ungefähr 3000 Cubikmeter (48000 Eimer bayerisch).

§. 361. Um das Gleichgewichtsniveau eines artesischen Brunnens zu bestimmen, ist es nicht gerade nothwendig, an seiner Mündung eine vertikale Röhre zu befestigen, welche sich bis zu diesem Niveau erhebt; dieses Mittel wäre in gewissen Fällen nur sehr schwierig anzuwenden; es kann durch folgendes ersetzt werden. Man verschliesst die Mündung des Bohrloches mittelst eines Pfropfens, der fest genug hält, dass er dem Drucke des Wassers auf seine untere Fläche zu widerstehen vermag; hierauf befestigt man in einer Oeffnung, welche zuvor in diesen Pfropfen gebohrt wurde, eine Röhre, die mit einem Manometer in Verbindung ist (§§. 312 u. 313). Die Luft dieser Röhre, welche durch das Wasser des artesischen Brunnens, das in sie eindringt, zusammengepresst wird, drückt ihrerseits wieder auf das Quecksilber des Manometers und der auf diese Weise hervorgebrachte Druck kann in Atmosphären ausgedrückt werden. Wenn man von der so erhaltenen Zahl eine Einheit abzieht und den Rest mit $10^m,33$ (§. 301) multiplicirt, so erhält man die Höhe des Gleichgewichtsniveau's des artesischen Brunnens über der Mündung seines Bohrloches, ausgedrückt in Metern. Man sieht in der That, dass der durch das Wasser auf die untere Fläche des Pfropfens ausgeübte Druck, der durch das Manometer gemessen wird, genau gleich dem ist, der eine Wassersäule zu tragen vermag, die sich in dem Fall, wo das Bohrloch nicht verschlossen, sondern mit einer vertikalen Röhre von genügender Höhe versehen ist, bis zum Gleichgewichtsniveau erheben könnte. Der in Rede stehende Druck ist im Stande, dieser Wassersäule und dem Drucke der atmosphärischen Luft, welcher auf ihre freie Oberfläche ausgeübt wird, das Gleichgewicht zu halten; er ist also gleich 2, 3, 4 Atmosphären, je nachdem die Höhe des Gleichgewichtsniveau's über der Mündung des Bohrloches 1, 2, 3 mal $10^m,33$ beträgt.

Es kommt oft vor, dass sich die Wassermenge, welche ein artesischer Brunnen liefert, vermindert. Diese Verminderung kann von zwei Ursachen herrühren: entweder übt der unterirdische Strom Wasser gegen den untersten Theil des Bohrloches keinen so grossen Druck mehr aus, oder auch das Innere dieses Bohrloches selbst ist durch Einstürzungen zum Theil verschüttet oder in gewissen Punkten von den festen Stoffen, welche das Wasser stets mit sich führt, verstopft worden. Ob die eine oder die

andere dieser beiden Ursachen die Verringerung der Wassermenge des Brunnens bewirkt, kann in jedem einzelnen Fall leicht durch die Bestimmung des Gleichgewichtsniveau's ermittelt werden. In dem ersteren Fall findet man, dass dieses Niveau sich gesenkt hat; im zweiten dagegen ist keine Aenderung in der Höhe desselben eingetreten.

Es gibt gewisse artesische Brunnen, deren Wassermenge sich mit der Höhe des Wassers in einem benachbarten fliessenden Gewässer verändert. Eine Erhöhung des Spiegels in diesem fliessenden Wasser ist von einer Vermehrung der Wassermenge begleitet, welche der Brunnen liefert. In ähnlicher Weise ändert sich die Wassermenge eines artesischen Brunnens, der in der Nähe des Meeres gelegen ist, periodisch mit der Ebbe und Fluth; diese Wassermenge vermehrt oder vermindert sich, je nachdem die Oberfläche des Wassers in dem nahen Meere steigt oder fällt. Der Grund dieser Erscheinung ist nach dem, was wir bisher gesagt haben, leicht einzusehen. Die unteren Punkte, in denen die wasserführende Schichte, durch welche der Brunnen gespeist wird, zu Tage streicht, diejenigen also, durch welche das Wasser aus dieser Schichte austritt, können verschiedene Lagen haben; wenn diese Punkte an solchen Stellen der Erdoberfläche gelegen sind, die für gewöhnlich nicht mit Wasser bedeckt sind, so tritt das Wasser ungehindert aus, es entspringen Quellen; aber dem ist nicht mehr so, wenn jene Punkte unter der Oberfläche des Wassers in einem Flusse oder einem Meere gelegen sind. In diesem letzteren Falle hat die Ausflussöffnung des unterirdischen Wasserstroms einen Druck zu erleiden, welcher von der Höhe des Wasserspiegels in dem Flusse oder dem Meere über dieser Oeffnung abhängig ist. Wenn sich folglich diese Höhe ändert, so ändert sich jener Druck in gleichem Sinne, und diese Aenderung macht sich natürlich in allen Punkten des unterirdischen Stroms fühlbar. Das Gleichgewichtsniveau eines artesischen Brunnens, der durch diesen Strom gespeist wird, hebt und senkt sich also zu gleicher Zeit mit dem Spiegel des Wassers, unter welchem die wasserführende Schichte in ihren untersten Punkten zu Tage tritt, und bringt dadurch eine entsprechende Vermehrung oder Verminderung der Wassermenge, welche der Brunnen liefert, hervor.

§. 362. Wenn das Gleichgewichtsniveau eines artesischen Brunnens unter der Erdoberfläche gelegen ist, so kann das Wasser nicht bis zur Mündung des Bohrloches emporsteigen; dieser Brunnen kann daher das Wasser nur in derselben Weise, wie die gewöhnlichen Brunnen liefern, unter der Bedingung also, dass

man gewisse Hilfsmittel anwendet, um das Wasser vollends bis auf die Oberfläche der Erde zu fördern. Aber wenn man, anstatt Wasser aus diesem Brunnen auszuschöpfen, im Gegentheil solches hineingiesst und dadurch das Niveau zu heben sucht, so wird das Gleichgewicht gestört. Die Wassersäule, welche nun in dem Brunnen steht, ist zu hoch, um durch die Drückungen, welche auf den untersten Theil des Bohrloches ausgeübt werden, noch getragen werden zu können; sie muss folglich sinken, bis das Niveau wieder an der alten Stelle steht. Man kann daher in einem solchen Brunnen ununterbrochen Wasser eingiessen, ohne dass er sich füllt; das eingegossene Wasser fliesst in den unterirdischen Wasserbehälter ab, mit welchem der Brunnen in Verbindung steht. Solche Brunnen nennt man absorbirende Brunnen.

Man bedient sich der absorbirenden Brunnen sehr häufig, um sich gewisser schädlicher Wasser zu entledigen, um z. B. sumpfiges Terrain auszutrocknen, oder um die Feuchtigkeit der Erde in der Nachbarschaft wichtiger Bauten, denen sie Schaden bringen könnte, zu entfernen, oder endlich um die ungesunden Flüssigkeiten, die in gewissen industriellen Etablissements erzeugt werden, zu beseitigen.

Ein interessantes Beispiel eines absorbirenden Brunnens ist der zu Saint-Denis bei Paris. Indem man auf dem Postplatze daselbst ein Bohrloch eintrieb, begegnete man zuerst einer absorbirenden Schichte, dann kam man tiefer unten auf einen Wasserbehälter, der einen oben heraus springenden Strahl lieferte, und endlich noch tiefer unten auf einen eben solchen, dessen Wasser aber besser als das des vorhergehenden war. Man brachte nun in diesem Bohrloch drei concentrische Röhren an, die alle drei bis zur Oberfläche der Erde heraufreichten, aber bis in verschiedene Tiefen hinabgingen. Die innerste und engste der drei Röhren wurde bis zu der zweiten wasserführenden Schichte, die einen oben herausfliessenden Strahl lieferte, eingesenkt. Die zweite Röhre, welche die erste so umhüllt, dass zwischen den beiden ein freier ringförmiger Raum bleibt, steigt bis zu der ersten wasserführenden Schichte hinab, welche das Wasser bis an die Oberfläche der Erde liefert. Die dritte Röhre endlich, welche die zweite auf dieselbe Art, wie diese die erste, umfasst, geht nur bis zur absorbirenden Schichte. In Folge dieser Einrichtung steigt das Wasser der untersten wasserführenden Schichte durch die mittelste Röhre herauf; dasjenige der zunächst darüber gelegenen durch den ringförmigen Raum zwischen der ersten und

zweiten Röhre, und der Ueberschuss dieses letzteren Wassers, der nicht verwendet wird, ergiesst sich in den ringförmigen Raum zwischen der zweiten und dritten Röhre in den absorbirenden Brunnen.

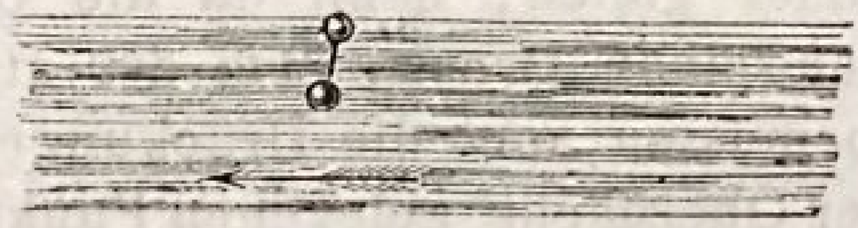
§. 363. **Bewegung des Wassers in den Kanälen.** — Wenn das Wasser in einem Kanal in Bewegung ist und denselben in seiner ganzen Länge durchläuft, so ist diese Bewegung, insoferne die Umstände, unter denen sie stattfindet, dieselben bleiben, eine völlig regelmässige. Vorausgesetzt, dass der Kanal durchaus dieselbe Form und dieselben Dimensionen habe, sowohl nach der Breite als nach der Tiefe, und dass die Neigung seiner Sohle ebenfalls durchweg die gleiche ist, so wird man finden, dass die Bewegung der Flüssigkeit überall in den verschiedenen Querschnitten, welche man sich der ganzen Ausdehnung des Kanals nach denken kann, genau die nämliche ist. Demnach ist es klar, dass sich jedes Molekül gleichförmig und in gerader Linie bewegen, und dass die freie Oberfläche der Flüssigkeit eben, und so geneigt sein muss, dass sie zur Sohle des Kanals parallel ist.

Die Bewegung des Wassers in einem Kanal kann mit der Bewegung einer Flüssigkeit in einer Röhre verglichen werden, deren Querschnitte ihrer ganzen Länge nach gleich gross sind. Der einzige Unterschied besteht darin, dass in dem Kanal das Wasser eine freie Oberfläche hat, während in einer Röhre die Flüssigkeit von den festen Wänden derselben ganz umhüllt wird. Die oben (§§. 352 bis 355) angestellten Betrachtungen werden also hier ebenfalls angewendet werden können, nur muss man dem eben bezeichneten Unterschied gehörig Rechnung tragen.

Zunächst ergibt sich, dass die verschiedenen Flüssigkeitsfäden nicht die nämliche Geschwindigkeit haben (§. 352); sie bewegen sich um so schneller, je weiter sie von den festen Wänden entfernt sind, zwischen denen das Wasser fliesst. Die grösste Geschwindigkeit wird also derjenige besitzen, der sich an der freien Oberfläche des Wassers, in der Mitte der Breite des Kanals, befindet; und wenn man sich von diesem Flüssigkeitsfaden aus den Ufern oder der Sohle des Kanals in irgend einer Richtung nähert, so wird man eine immer kleinere und kleinere Geschwindigkeit finden. Aber wir haben dabei vernachlässigt, dass die freie Oberfläche des Wassers mit der atmotsphärischen Luft in Berührung steht, und desshalb ist das Resultat, das wir soeben erhalten haben, nicht streng richtig: die grösste Geschwindigkeit der Flüssigkeitsmoleküle wird nicht an der freien Oberfläche selbst, sondern etwas unterhalb derselben beobachtet. Die atmosphärische Luft

übt einen Druck auf die freie Oberfläche des Wassers aus und bringt in Folge dessen einen, wenn auch nur schwachen Reibungswiderstand hervor, der die Bewegung der Flüssigkeitsmoleküle an der Oberfläche etwas verzögert.

Um sich davon zu überzeugen, dass in der That die Geschwindigkeit des Wassers in der Mitte der Breite des Kanals auf der Oberfläche etwas geringer ist, als in geringem Abstand unter derselben, kann man sich zweier Wachskugeln bedienen, die durch einen kurzen Faden miteinander verbunden sind. Wenn man das Wachs, aus dem diese Kugeln gebildet werden, zuvor mit kleinen Mengen anderer passender Substanzen vermengt, kann man es leicht dahin bringen, dass die eine der beiden Kugeln eine geringere, die andere dagegen eine grössere Dichtigkeit als das Wasser besitzt, dass aber beide zusammen noch so in dem Wasser schwimmen können, dass die obere, leichtere etwas über die Oberfläche desselben hervorragt. Wenn diese Kugeln in ein ruhig stehendes Wasser getaucht werden, so stellt sich die eine so unter die andere, dass der sie verbindende Faden vertikal ist. Aber wenn man sie in die Mitte eines Kanals wirft, dessen Wasser in Bewegung ist, so werden sie in die Bewegung des Wassers mit hineingezogen, und man sieht nun, dass der Faden, welcher sie verbindet, nicht mehr vertikal bleibt (Fig. 496); die untere Kugel stellt sich etwas vor die obere. Es ist klar, dass diese Lage, welche die beiden Kugeln in diesem Wasser annehmen, nur davon herrühren kann, dass die Geschwindigkeit in geringem Abstand unter der Oberfläche etwas grösser ist als an dieser Oberfläche selbst.


Fig. 496.

Da nach dem Vorhergehenden die Geschwindigkeiten der Moleküle, welche zu gleicher Zeit durch einen und denselben Querschnitt des Kanals hindurchgehen, verschieden sind, so wird man unter der Geschwindigkeit des Wassers überhaupt eine mittlere Geschwindigkeit zu verstehen haben; in der That bezeichnet man damit die Geschwindigkeit, welche allen Molekülen zugleich zukommen müsste, damit die Wassermenge, welche in einer Secunde den betrachteten Querschnitt durchströmt, die nämliche Grösse behält (§. 353). Nach dieser Definition der Geschwindigkeit eines fliessenden Wassers ist es klar, dass man diese Geschwindigkeit, wenn sie bekannt ist, nur mit der Grösse des Querschnitts des Kanals multipliciren darf, um das Wasservolumen zu erhalten, welches in einer Secunde durch diesen Querschnitt hindurch-

geht. Man nennt dieses Wasservolumen kurz die **Wassermenge** des Kanals.

§. **364.** Die Gleichförmigkeit der Bewegung jedes Flüssigkeitsmoleküls in dem Kanal erfordert, dass die Kräfte, welche an diesem Molekül wirken, im Gleichgewicht sind und folglich auch, dass sich die Kräfte, welche auf eine Flüssigkeitsscheibe, die zwischen zwei einander sehr nahe gelegenen Querschnitten enthalten ist, wirken, das Gleichgewicht halten. Die Kräfte aber, welche auf eine solche Scheibe wirken, sind wieder von dreierlei Art (§. 354): 1) In dem Falle, wo die Sohle des Kanals im Sinne der Bewegung des Wassers geneigt ist, gibt das Gewicht der betrachteten Scheibe eine zu dieser Sohle parallele Componente, welche ihre Bewegung zu beschleunigen sucht; 2) die beiden ebenen Seitenflächen der Scheibe haben von Seite der benachbarten Flüssigkeit Drückungen zu erleiden; 3) die Flüssigkeitsscheibe erleidet einen Widerstand gegen ihre Bewegung, der von der Reibung herrührt, welche sich sowohl an den festen Wänden, welche das Wasser umschliessen, als durch die Berührung derselben mit der Luft entwickelt. Nun sind die Drückungen, welche die Scheibe auf ihren beiden Seitenflächen erfährt, offenbar einander gleich; denn da die Oberfläche des Wassers durchweg demselben Druck, dem der atmosphärischen Luft ausgesetzt ist, so müssen auch die Drückungen, welche in den gleich tief unter der Oberfläche gelegenen Punkten der verschiedenen Querschnitte stattfinden, einander gleich sein, an welcher Stelle des Kanals diese Querschnitte auch gemacht werden mögen. Die Drückungen, welche auf die beiden Begrenzungsquerschnitte unserer Flüssigkeitsscheibe ausgeübt werden, heben sich also gegenseitig auf und es bleiben folglich nur noch die beiden andern Kräfte übrig, die sich nothwendig ebenfalls im Gleichgewichte halten müssen. Die im Sinne der Bewegung wirkende Componente des Gewichtes der Flüssigkeitsscheibe muss folglich gleich den Widerständen sein, welche durch ihre Reibung an dem Bette des Kanals, sowie an der Luft hervorgebracht werden. Man sieht daraus, dass die Neigung der Kanalsohle nothwendig erforderlich ist, damit die Bewegung des Wassers eine regelmässige sei. Ferner ist die im Sinne der Bewegung wirkende Componente des Gewichtes einer Flüssigkeitsscheibe um so grösser, je stärker die Sohle des Kanals geneigt ist: die Geschwindigkeit des fliessenden Wassers vergrössert sich also mit dieser Neigung und sie muss in der That so gross werden, dass die Reibung an den Wänden, welche mit dieser Geschwindigkeit wächst (§. 355), im Stande

ist, jener Componente des Gewichts der Scheibe das Gleichgewicht zu halten.

Der hiernach bestehende Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit eines in einem Kanal von den oben vorausgesetzten Eigenschaften fliessenden Wassers, der Neigung der Sohle dieses Kanals und den zu überwindenden Widerständen wird nach den *Eytelwein*schen Berechnungen der 91 Beobachtungen von *Dubuat*, *Brünings*, *Funk* und *Woltmann* durch die Formel

$$v = 50{,}9 \sqrt{\frac{Fh}{pl}}$$

ausgedrückt. Darin bedeutet v die mittlere Geschwindigkeit des Wassers, F den Flächeninhalt des Querschnitts des Kanals und p die Länge des Umfangs dieses Querschnitts, soweit das Wasser mit dem Bette in Berührung ist, l die Länge des betrachteten regelmässigen Stückes des Kanals und h die Höhe, um welche sich auf diese Länge die Sohle oder die Oberfläche des Wassers senkt. Hiebei hat man p, h und l in Metern und F in Quadratmetern auszudrücken; das gefundene v gibt dann die Geschwindigkeit in Metern ausgedrückt. Der Coëfficient 50,9 ändert sich mit der Beschaffenheit des Bettes etwas.

§. 365. **Bewegung des Wassers in Flüssen.** — Die Bewegung des Wassers in einem Flusse ist ähnlich derjenigen, mit welcher wir uns so eben beschäftigt haben, nur ist sie nicht so regelmässig, da einerseits das Bett des Flusses nicht durchaus die nämliche Breite und Tiefe hat und andererseits seine Sohle nicht durchweg gleich stark geneigt ist. Nichtsdestoweniger kann man, wenn ein Stück des Flusses von gewisser Ausdehnung nicht zu grosse Unregelmässigkeiten enthält, die Bewegung des Wassers als dieselbe betrachten, wie sie in einem Kanal stattfindet, und Alles, was wir in Bezug auf die Bewegung des Wassers in einem solchen Kanal gesagt haben, kann auf diesen Theil des Flusses angewendet werden. Gewöhnlich vermehrt sich die Wassermenge eines Flusses von seiner Quelle bis zu seiner Mündung, sei es in Folge von Zuflüssen, welche sich in ihn ergiessen, sei es in Folge von Quellen, die in seinem Bette vorkommen. Untersuchen wir nun die Bewegung des Wassers in einem mehr oder weniger grossen Stück des Flusses, indem wir voraussetzen, dass die Quantität des Wassers, welches in einer Secunde durch irgend einen Querschnitt dieses Stückes hindurchfliesst, überall dieselbe ist, dass also dieser Theil des Flusses keinen Zufluss irgend einer Art empfängt. Wenn man den Lauf eines Flusses verfolgt, so findet man häufig, dass sich die Geschwindigkeit des Wassers von einer Stelle zur andern oft sehr bedeutend ändert; diese Aenderungen der Geschwindigkeiten sind aber stets von Aenderungen in den Dimensionen des Querschnitts begleitet, sei es,

dass der Fluss seine Breite oder seine Tiefe oder beide zugleich vergrössert oder verkleinert. In der That wissen wir, dass man das Volumen der Flüssigkeit erhält, welche in jeder Secunde durch einen Querschnitt fliesst, wenn man den Flächeninhalt dieses Querschnitts, welcher durch die Flüssigkeit senkrecht auf die Richtung ihrer Bewegung gemacht wird, mit der mittleren Geschwindigkeit, welche diesem Querschnitt entspricht, multiplicirt (§. 363); und da dieses Volumen unserer Voraussetzung nach für alle Querschnitte, welche in dem Theil des Flusses, mit dem wir uns beschäftigen, gemacht werden können, dasselbe sein soll, so folgt, dass der Flächeninhalt eines solchen Querschnitts um so kleiner werden muss, je grösser die Geschwindigkeit in demselben ist. Demnach wird an solchen Stellen, wo der Fluss sehr breit und tief ist, das Wasser fast ruhig stehen bleiben, während es an engen und seichten Stellen des Flussbettes eine grosse Geschwindigkeit annehmen muss.

Denken wir uns nun zwei Flüssigkeitsscheiben von gleichem Volumen, deren jede zwischen zwei Querschnitten enthalten ist, die in geringen Entfernungen durch den Fluss gemacht worden sind. Nehmen wir an, dass die erste dieser Scheiben einer Stelle des Flusses entspreche, wo das Bett breit und tief ist, dass also die Geschwindigkeit dieser Scheibe nur gering sei; die zweite Scheibe dagegen entspreche einer Stelle, wo das Bett nur eine geringe Breite und Tiefe hat, sodass ihre Geschwindigkeit grösser als die der ersten ist. Aus der Bedingung, dass die Volumina der beiden Scheiben gleich gross sein müssen, folgt, dass die Entfernung der Querschnitte, durch welche die zweite Scheibe begrenzt wird, oder die Dicke dieser Scheibe, in dem nämlichen Verhältniss grösser sein muss als die Dicke der ersten, als die Querschnitte der zweiten Scheibe kleiner als bei der ersten sind. Demnach wird man ohne Schwierigkeit einsehen, dass sich die zweite Scheibe an einer grösseren Fläche reibt als die erste. Ausserdem hat diese zweite Scheibe auch eine grössere Geschwindigkeit als die erste; es ist folglich aus diesem doppelten Grunde der durch die Reibung an den Ufern und der Sohle des Flussbettes hervorgebrachte Widerstand grösser für die zweite Scheibe als für die erste (§. 355). Dieser Widerstand muss aber bei jeder Scheibe durch die Componente ihres Gewichtes, die parallel zur Richtung der Bewegung ist, überwunden werden (§. 364); und da die Gewichte unserer beiden Scheiben gleich gross sind, so folgt, dass sich die Moleküle des Wassers in der zweiten Scheibe in einer stärker geneigten Linie bewegen müssen,

als in der ersten, dass also die Neigung der Wasseroberfläche an der Stelle, wo der zweite Querschnitt gemacht worden ist, grösser sein muss als an der, wo sich der erste befindet. Ueberall also, wo das Bett des Flusses breit und tief ist, wo also das Wasser nur eine geringe Geschwindigkeit besitzt, da ist die Oberfläche desselben fast horizontal, während an solchen Stellen, wo die Bewegung des Wassers in Folge von Verengungen des Querschnitts, sowohl der Breite als der Tiefe nach, immer rascher wird, die Oberfläche des Wassers eine viel deutlicher ausgesprochene Neigung zeigt.

§. 366. Zur Zeit eines Hochwassers ist die Geschwindigkeit des Wassers in dem Flusse bedeutend grösser als unter den gewöhnlichen Umständen. Um sich davon Rechenschaft zu geben, darf man nur zusehen, in welcher Weise sich die beiden Kräfte, die unter allen Umständen in jeder Flüssigkeitsscheibe, wie wir sie uns oben dachten, im Gleichgewicht sein müssen, ändern, wenn das Niveau des Flusses ein anderes wird. Setzen wir voraus, dass die Oberfläche des Wassers für gewöhnlich in AB (Fig. 497) sei, dass sie sich aber zur Zeit des Hochwassers bis CD erhebt,

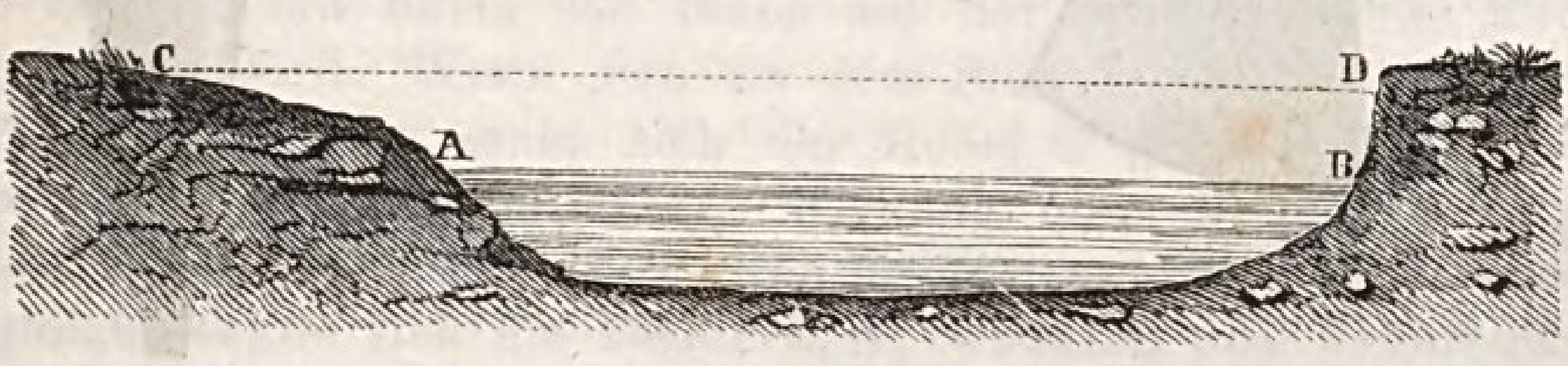


Fig. 497.

und dass dadurch der Flächeninhalt des Querschnitts durch die Flüssigkeitsmasse doppelt so gross als vorher wird. Dann ist offenbar die Flüssigkeitsmenge, welche zwischen zwei benachbarten Querschnitten gelegen ist, doppelt so gross zur Zeit des Hochwassers als gewöhnlich; aber die Oberfläche der Wände, welche von dieser Flüssigkeitsmasse berührt werden, hat nicht in demselben Verhältniss zugenommen. Wenn daher die Geschwindigkeit des Wassers dieselbe bliebe, so würde zwischen der Kraft, welche die Bewegung unserer Flüssigkeitsscheibe zu beschleunigen sucht, und dem Widerstand, welcher sich dieser Beschleunigung entgegensetzt, nicht mehr Gleichgewicht bestehen können, denn die erstere ist durch die Erhöhung des Niveau's verdoppelt worden, während der zweite nicht in demselben Verhältniss gewachsen ist. Es ist also nothwendig, dass sich die Geschwindigkeit des Wassers vergrössert, damit die Reibung des Wassers an den Wänden, mit denen es in Berührung ist, wieder gross genug

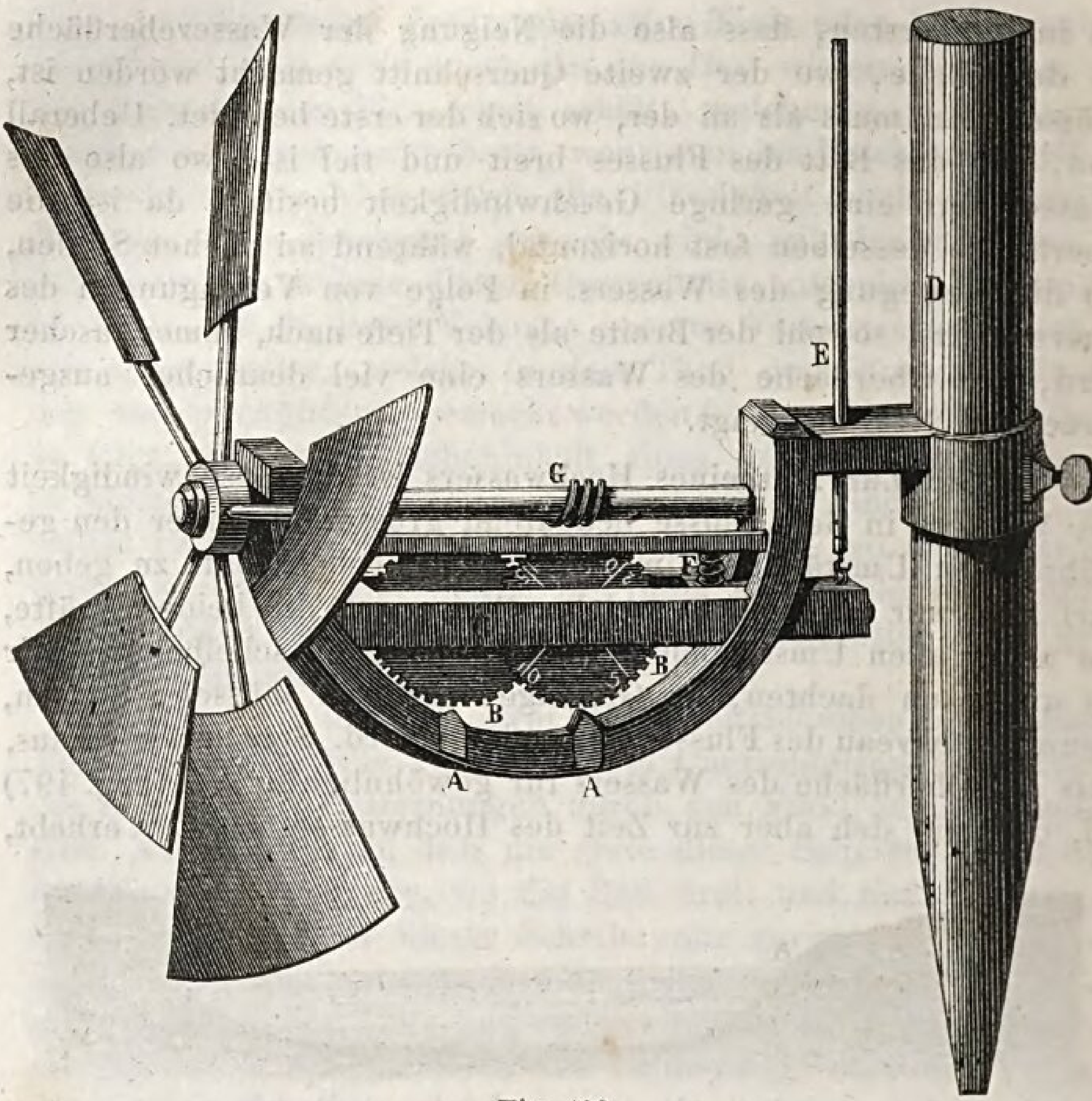


Fig. 498.

wird, um der in der Richtung der Bewegung wirkenden Componente des Gewichtes das Gleichgewicht zu halten.

§. 367. Messung der Geschwindigkeit des Wassers. Um die Geschwindigkeit, welche das Wasser eines Flusses in irgend einer Tiefe unter der Oberfläche besitzt, zu messen, bedient man sich am besten des *Woltmann*'schen Flügels (Fig. 498) — manchmal auch hydraulischer oder hydrometrischer Flügel genannt. — Dieses Instrument besteht aus einem kleinen Rädchen, das durch mehrere ebene Metallplättchen oder Flügel gebildet wird, die an den Enden von ebenso vielen, in einer horizontalen Welle steckenden Armen befestigt sind. Die Welle, welche dieses Rad trägt, muss in der Richtung der Bewegung des Wassers aufgestellt werden. Die Flügel sind so angeordnet, dass sie sich den Flüssigkeitsfäden, welche ihnen begegnen, in schiefer Richtung darbieten; der schiefe Stoss, den die Flügel in Folge dieser Anordnung von Seite des Wassers erhalten, erzeugt eine drehende

Bewegung des Rades, welche offenbar um so schneller wird, je grösser die Geschwindigkeit des Wassers ist. Man begreift daraus, dass aus der Zahl der Umdrehungen, welche das Flügelrädchen in einer gegebenen Zeit macht, die Geschwindigkeit des Wassers erhalten werden kann.

Das Instrument, welches die Fig. 498 in natürlicher Grösse darstellt, ist so eingerichtet, dass es die Zahl der Umdrehungen der Welle, welche die Flügel trägt, leicht zu zählen gestattet. Zu diesem Behufe ist diese Welle mit einer Schraube ohne Ende G versehen. Unter dieser Schraube befindet sich ein Zahnrad, welches in sie eingreifen kann, für gewöhnlich aber gesenkt ist, sodass keine Verbindung zwischen ihm und der Schraube besteht. Zur Seite dieses ersten Rades befindet sich ein zweites, das durch ein, auf der Achse jenes ersten Rades befestigtes Trieb in Bewegung gesetzt wird und sich viel langsamer dreht als jenes. Die Achsen dieser beiden Räder B, B werden durch einen Hebel C getragen, der um sein linkes Ende beweglich ist und durch einen an seinem rechten Ende befestigten Stab E gehoben werden kann; mit ihm zugleich bewegen sich die Räder B, B, wodurch der Eingriff des einen von ihnen mit der Schraube ohne Ende hergestellt wird. Wenn man an dem Stab E nicht mehr nach aufwärts zieht, so senkt sich der Hebel C sowohl durch sein eigenes Gewicht, als unter der Wirkung einer Feder F, deren oberes Ende sich gegen das Gestell des Instruments stützt, herab; zugleich senken sich die Räder B, B, wodurch ihre Verbindung mit der Schraube wieder aufgehoben wird; bei dieser Senkung legen sich zwei kleine Vorsprünge A, A alsbald zwischen die Zähne der Räder B, B und verhindern deren weitere Drehung. Der ganze Apparat kann der Höhe nach an einer längeren vertikalen Stange D verschoben und mittelst einer Klemmschraube in jedem beliebigen Punkt derselben festgestellt werden.

Um den Flügel zu gebrauchen, befestigt man ihn so weit von dem Fusspunkte der Stange D, als die Höhe beträgt, in welcher die Geschwindigkeit des Wassers des Flusses über der Sohle desselben gemessen werden soll; hierauf stellt man die Stange in vertikaler Richtung so in das Wasser, dass ihr unteres Ende die Sohle berührt und sich sogar etwas in dieselbe einsenkt, und das Flügelrädchen vor die Stange, d. h. an die Seite derselben zu stehen kommt, welcher das Wasser zuerst begegnet. Nach Verfluss einer kurzen Zeit werden die Flügel unter der Einwirkung des Wassers eine gleichförmige Rotationsbewegung angenommen haben; alsdann zieht man den Stab E an und setzt

so die Räder B, B in Verbindung mit der Welle des Flügels. Diese Verbindung lässt man eine gewisse Zeit, eine Minute z. B., hergestellt; dann lässt man den Stab E nach, die Räder senken sich wieder, und ihre Verbindung mit der sich fortdrehenden Welle der Flügel wird aufgehoben; zugleich aber wird durch das Eindringen der Vorsprünge A, A zwischen ihre Zähne die Bewegung der Räder eingehalten. Man zieht nun das Instrument aus dem Wasser und vergleicht die Stellung, welche die Räder nun gegen die Vorsprünge A, A einnehmen mit der, welche sie vor dem Versuche inne hatten; diese Vergleichung ergibt offenbar die Zahl der Zähne, um welche sich das Rad zur Rechten während der Dauer des Experiments gedreht hat; diese Zahl ist aber zugleich die Anzahl der Umdrehungen, welche das Flügelrad in derselben Zeit machte, denn bei jeder Umdrehung der Welle des Flügelrades schreitet jenes Rad um einen Zahn fort.

Man wird ohne Schwierigkeit einsehen, dass die Zahl der Umdrehungen des Flügels in einer bestimmten Zeit proportional der Geschwindigkeit des Wassers sein muss: man darf also nur die Zahl der Umdrehungen kennen, welche der Flügel bei einer bestimmten Geschwindigkeit des Wassers in einer bestimmten Zeit vollführt, um in jedem andern Fall aus der vom Instrument angegebenen Zahl der Umdrehungen, die während der Dauer des Versuchs gemacht worden sind, die Geschwindigkeit des fliessenden Wassers berechnen zu können. Wenn man z. B. weiss, dass der Flügel in der Secunde 8 Umdrehungen macht, wenn die Geschwindigkeit das Wasser 1^m in der Secunde ist, und es wurde bei einem Versuch gefunden, dass der Flügel 20 Umdrehungen in der Secunde machte, so folgt daraus, dass die Geschwindigkeit des Wassers, welches ihn in Bewegung setzte, $2^m,5$ in der Secunde war.

Die Schnelligkeit, mit welcher sich die Flügelwelle des Instruments unter der Einwirkung eines fliessenden Wassers, dessen Geschwindigkeit 1^m in der Secunde beträgt, dreht, hängt von den Dimensionen dieses Instruments und von der Stellung seiner Flügel ab. Sie wird bestimmt, indem man das Instrument entweder in ein fliessendes Wasser taucht, dessen Geschwindigkeit bekannt ist, oder indem man es in ruhig stehendem Wasser um eine gewisse Strecke fortbewegt.

§. 368. Mittelst des *Woltmann*'schen Flügels kann die Geschwindigkeit des Wassers in einem Flusse in irgend einer Tiefe unter der Oberfläche desselben gemessen werden. Aber wenn man sich damit begnügen will, die Geschwindigkeit an der Ober-

fläche selbst zu messen, so kann man ein einfacheres Mittel anwenden. Man darf dann nur einen Körper nehmen, der auf dem Wasser schwimmt, und dessen Bewegung man leicht beobachten kann. Doch muss man dafür sorgen, dass der Körper fast gar nicht aus dem Wasser hervorsieht, damit seine Bewegung nicht durch den Widerstand der Luft verzögert wird; wenn dann ausserdem noch die Masse des Körpers nur gering ist, so kann man sicher sein, dass er sehr nahezu dieselbe Geschwindigkeit besitzt, wie das Wasser selbst. Ein solcher Körper, der die oben bezeichneten Bedingungen in hohem Grade erfüllt, ist eine Oblate, und man bedient sich daher einer solchen mit grossem Vortheil zu dem angegebenen Zweck.

Wenn das Bett des fliessenden Wassers auf eine gewisse Länge hin regelmässig ist, so wird der Schwimmer auf dieser ganzen Länge eine gleichförmige Bewegung haben, und man darf also nur die Zahl der Secunden bestimmen, welche er braucht, um eine gewisse bekannte Entfernung zurückzulegen, um seine Geschwindigkeit zu erhalten. Zu dem Ende wird man quer über den Fluss zwei gerade Linien ausstecken, was entweder mittels zweier Visirstäbchen für jede Linie oder durch sonst irgend ein Mittel geschehen kann. Man misst die Entfernung dieser beiden Linien von einander und beobachtet alsdann die zwei Zeitpunkte, wo der Schwimmer, den man etwas weiter oben in den Fluss geworfen hat, die Richtung jeder von diesen beiden Linien passirt.

§. 369. Um die mittlere Geschwindigkeit eines fliessenden Wassers, wie wir sie oben (§. 363) definirt haben, zu finden (also die Geschwindigkeit, welche die ganze Flüssigkeitsmasse haben müsste, wenn sie sich wie ein Stück bewegen und die Wassermenge des fliessenden Wassers doch dieselbe bleiben sollte), kann man verschiedene Mittel anwenden. Wir begnügen uns hier, das einfachste anzugeben, welches darin besteht, dass man die mittlere Geschwindigkeit des fliessenden Wassers aus der Geschwindigkeit an der Oberfläche desselben, die man mittelst eines Schwimmers beobachtet hat, ableitet. Man kann sich zu diesem Zwecke der folgenden Tabelle bedienen, welche für verschiedene Werthe der Geschwindigkeit an der Oberfläche die entsprechende mittlere Geschwindigkeit gibt. Diese Tabelle ist aus den Versuchen von *Dubuat* berechnet, und obwohl diese Versuche nur im Kleinen angestellt worden sind, so hat man doch gefunden, dass die Resultate, welche sie ergaben, ohne grossen Fehler zu der Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit grösserer fliessender Gewässer angewandt werden können.

Tabelle 20. Mittlere und Oberflächen-Geschwindigkeit.

Geschwindigkeit an der Oberfläche.	Mittlere Geschwindigkeit.	Geschwindigkeit an der Oberfläche.	Mittlere Geschwindigkeit.
m.	m.	m.	m.
0,20	0,15	2,20	1,88
0,40	0,31	2,40	2,06
0,60	0,47	2,60	2,25
0,80	0,64	2,80	2,43
1,00	0,81	3,00	2,62
1,20	0,98	3,20	2,81
1,40	1,16	3,40	3,00
1,60	1,34	3,60	3,18
1,80	1,52	3,80	3,37
2,00	1,70	4,00	3,56

Die Geschwindigkeit der Seine in der Nähe von Paris ist $0^m,60$ bis $0^m,65$. Die Geschwindigkeiten der Rhone und des Rheins sind ungefähr 2^m und erheben sich, bei starkem Hochwasser, auf 4^m in der Secunde.

§. 370. **Aichen eines fliessenden Wassers.** — Das einfachste Mittel, ein fliessendes Wasser zu aichen, d. h. die Wassermenge zu bestimmen, die es in einer Secunde liefert, besteht darin, dass man den Flächeninhalt des Querschnitts der Flüssigkeitsmasse mit der mittleren Geschwindigkeit, welche sie in der Nähe dieses Querschnitts besitzt, multiplicirt (§. 363).

Wie man die bei diesem Verfahren nöthige Geschwindigkeit misst, haben wir soeben gesehen. Was die Bestimmung der Grösse des Querschnitts des fliessenden Wassers anbelangt, so kann dieselbe ohne Schwierigkeit erhalten werden, wenn man die Tiefe des Wassers an mehreren Punkten, die in einer zur Bewegungsrichtung des Wassers senkrechten Linie gelegene sind, misst. Wenn man dabei findet, dass die Tiefe nach der ganzen Breite eines fliessenden Wassers, dessen Ufer vertikal abfallen, die nämliche ist, so schliesst man daraus, dass der Querschnitt des Wassers die Form eines Rechtecks hat; man findet daher seine Grösse, indem man die Breite des Flusses mit der Tiefe des Wassers multiplicirt. Wenn man dagegen, wie es im Allgemeinen der Fall sein wird, verschiedene Tiefen erhält, je nachdem man sich mehr oder weniger von den Ufern entfernt,

so misst man diese Tiefen über die ganze Breite des Flusses in Punkten, die alle gleich weit, z. B. um einen Meter, von einander abstehen. Man betrachtet alsdann den Theil des Querschnitts, der zwischen zwei auf einander folgenden Tiefen, die man gemessen hat, enthalten ist, als ein Trapez, dessen parallele Seiten eben jene Tiefen sind, und dessen Höhe die horizontale Entfernung der Punkte ist, wo diese Tiefen genommen wurden. Indem man die Flächeninhalte dieser verschiedenen Trapeze addirt, erhält man die Grösse des ganzen Querschnitts.

Wenn man z. B. findet, dass ein fliessendes Wasser, dessen Breite 8^m beträgt, durchweg $1^m,6$ tief ist, so wird man daraus schliessen, dass die Grösse seines Querschnitts 12,8 Quadratmeter ist; wenn sich folglich das Wasser mit einer mittleren Geschwindigkeit von $1^m,5$ in der Secunde bewegt, so ist die in einer Secunde gelieferte Wassermenge 19,2 Cubikmeter.

Ein fliessendes Wasser wird gewöhnlich F l u s s genannt, wenn seine Wassermenge unter gewöhnlichen Umständen nicht unter 10 bis 12 Cubikmeter in der Secunde beträgt. Wenn sich die Wassermenge auf 30 bis 40 Cubikmeter erhebt, so wird der Fluss gewöhnlich s c h i f f b a r. Wenn die Wassermenge 100 Cubikmeter überschreitet, so rechnet man das fliessende Wasser zur Klasse der S t r ö m e. So liefert unter gewöhnlichen Umständen die Seine bei Paris ungefähr 130, die Garonne bei Toulouse 150 und die Rhone bei Lyon mehr als 600 Cubikmeter Wasser in der Secunde. Ausserdem ändert sich die Wassermenge eines fliessenden Wassers von einer Zeit zur anderen. So hat man die Wassermenge der Rhone bei Lyon schon bis auf 200 Cubikmeter herabgehen sehen, während sie sich am 12. Februar 1815 auf 5770 Cubikmeter erhob.

§. 371. Um die Wassermenge eines kleinen fliessenden Wassers, eines Baches oder eines Mühlgerinnes z. B., direkt durch den Versuch zu bestimmen, kann man sich zweier Mittel bedienen. Das erste besteht darin, dass man quer über die ganze Breite des fliessenden Wassers einen Damm, ein sog. W e h r baut, wenn ein solches nicht schon zu anderen Zwecken, wie z. B. um das Wasser flussaufwärts aufzustauen, vorhanden ist. Dadurch wird ein sog. Ueberfall herbeigeführt, wie er z. B. in Fig. 483, Seite 690 abgebildet ist. Die Wassermenge, welche über einen solchen Ueberfall fliesst, ist offenbar gleich der Wassermenge des fliessenden Wassers; die letztere kann daher ganz nach der in §. 346 gegebenen Regel bestimmt werden.

Das zweite Mittel besteht darin, dass man sich der Schützen bedient, die in dem Falle, wo das fliessende Wasser als Motor

zur Bewegung eines Wasserrades dienen soll, immer vorhanden sind. Diese Schützen bestehen, wie bekannt, aus rechteckigen, vertikalen oder schiefen Wänden, welche quer in das fliessende Wasser gestellt sind, um dasselbe in seiner Bewegung zu hemmen, und welche man mehr oder weniger aufziehen kann, um das Wasser unter ihnen durch die sich bildende gleichfalls rechteckige Oeffnung ausfliessen zu lassen. Wenn man keine solche Schütze zur Verfügung hat, so führt man durch das Gerinn oder den Mühlkanal eine Querwand mit rechteckiger Oeffnung F (Fig. 481, S. 689), oder man dämmt den Bach durch einen aus Pfählen und Brettern bestehenden Einbau AB (Fig. 499) ein und lässt das Wasser durch eine in demselben angebrachte Oeffnung C abfliessen. In allen diesen Fällen ist die Wassermenge, welche durch die rechteckige Oeffnung fliesst, gleich der Wassermenge des fliessenden Gewässers, und letztere kann daher nach den Regeln, die in den §§. 343 bis 345 aufgestellt wurden, berechnet werden.

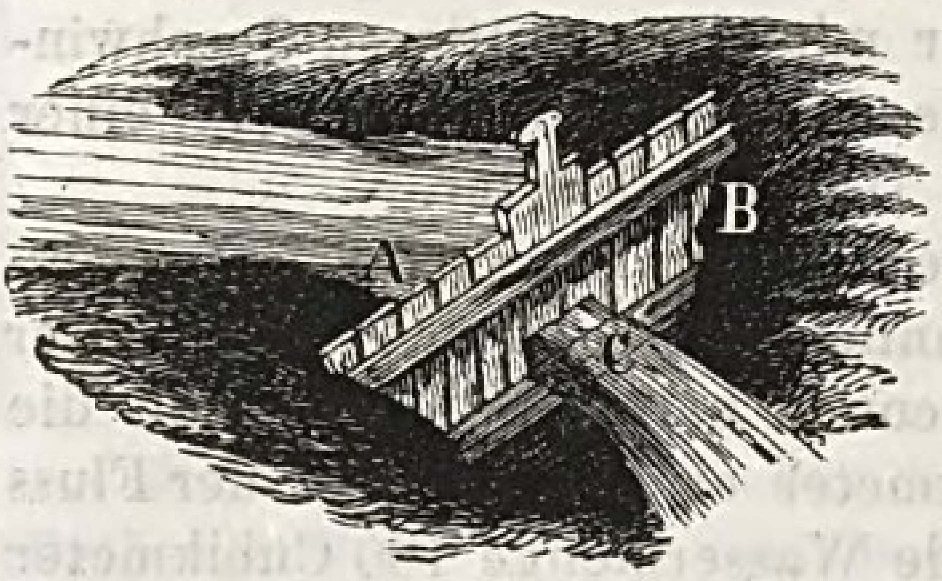


Fig. 499

§. 372. **Wassermesser.** — Um die Wassermenge, welche eine Röhrenleitung in einer bestimmten Zeit durchfliesst, zu messen, ohne die Bewegung des Wassers selbst zu hemmen, bedient man sich der sog. Wassermesser. Diese werden besonders bei Wasserleitungen in Städten, dann zum Messen des einem Dampfkessel zugeführten Speisewassers etc. angewendet. Es gibt verschiedene Arten derselben. Als die besten hat man in neuester Zeit die von der *Manchester Water Company* anerkannt. Dieselben bestehen aus einem grösseren oder kleineren Hohlcylinder, in welchem sich, dicht schliessend, ein Kolben durch den Druck des zu messenden und den Wassermesser durchströmenden Wassers hin und her bewegt, wie der Kolben in einer Dampfmaschine oder einer Wassersäulenmaschine (s. unten). Die Dichtung dieses Kolbens besteht aus einem wulstförmigen Ring von Kautschuk, der um ihn herumgelegt ist und sich bei seiner Bewegung hin und her wälzt. Bei jedem Hin- oder Hergang (Hub) des Kolbens geht ein gewisses Quantum Wasser durch den Wassermesser und also durch die Rohrleitung. Man braucht folglich nur durch ein Zählerwerk die Anzahl der Kolbenhübe zu zählen, um die gesammte Wassermenge zu erhalten.

§. 373. Ausfluss eines Gases durch eine Oeffnung. Wenn ein Gas in einem allseitig geschlossenen Gefäss enthalten ist und man bringt in der Wand dieses Gefässes eine kleine Oeffnung an, so sucht das Gas in Folge seiner Spannkraft aus dieser auszutreten. Wenn der Raum, welcher das Gefäss von aussen in der Nachbarschaft der Oeffnung umgibt, selbst ein Gas enthält, welches die nämliche Spannkraft besitzt wie das im Gefäss, so ist klar, dass das letztere nicht ausströmen kann; es wird durch den Widerstand des äusseren Gases im Gefäss zurückgehalten, ebenso als wenn gar keine Oeffnung in die Gefässwand gemacht worden wäre. Dies ist z. B. der Fall, wenn eine Gasmasse unter dem Drucke einer Atmosphäre in ein Gefäss eingeschlossen ist, das sich selbst inmitten der atmosphärischen Luft befindet. Wenn aber der Raum, in welchen sich das innere Gas, indem es bei der ihm dargebotenen Oeffnung austritt, ergiessen kann, vollkommen leer ist, oder auch schon, wenn er ein Gas, von geringerer Spannkraft als diejenige des inneren Gases ist enthält, so wird das im Gefäss enthaltene Gas durch die Oeffnung ausströmen. Dieser Ausfluss wird mit um so grösserer Geschwindigkeit stattfinden, je grösser der Ueberschuss der Spannkraft im Innern über die Spannkraft aussen ist.

Um die Ausflussgeschwindigkeit eines Gases durch eine Oeffnung, welche wir zunächst in dünner Wand voraussetzen, zu finden, können wir dieses Gas mit einer Flüssigkeit vergleichen. Denken wir uns zu diesem Behuf, dass eine Flüssigkeit dieselbe Dichtigkeit wie das ausströmende Gas habe, diese Dichtigkeit im Innern des Gefässes, welches das Gas enthält, im Niveau der Ausflussöffnung genommen; denken wir uns ferner, dass eine solche Flüssigkeit in ein oben offenes Gefäss bis zu einer solchen Höhe gefüllt würde, dass der Druck, welcher aus dieser Höhe im Niveau der Oeffnung, durch welche der Ausfluss geschieht, hervorgeht, gleich dem Ueberschuss des Druckes des inneren über den des äusseren Gases sei. Da diese Flüssigkeit dieselbe Dichtigkeit wie unser Gas in der Nähe der Ausflussöffnung hat, und da sie an dieser Oeffnung dem nämlichen Druck ausgesetzt ist, so ist klar, dass sie mit derselben Geschwindigkeit ausströmen muss wie das Gas. Aber die Geschwindigkeit, welche die Flüssigkeit annimmt, ist diejenige, welche der Höhe seiner freien Oberfläche im Gefäss über der Oeffnung entspricht; mit derselben Geschwindigkeit strömt auch das Gas aus.

Die Anwendung des Vorhergehenden auf ein besonderes Beispiel wird zeigen, wie die Ausflussgeschwindigkeit eines Gases

in jedem Fall bestimmt werden kann. Nehmen wir an, dass in einem geschlossenen Gefäss atmosphärische Luft enthalten sei, deren Spannkraft durch eine Quecksilbersäule von $0^m,77$ Höhe gemessen wird. Diese Luft habe die Temperatur von 0^0, und der Druck der äusseren atmosphärischen Luft, welche das Gefäss umgibt, sei $0^m,76$. Wenn man an dem Gefäss in einer dünnen Wand eine Oeffnung anbringt, so wird die innere Luft in Folge des Ueberschusses des inneren Druckes über den äusseren, welcher Ueberschuss durch eine Quecksilbersäule von $0,^m01$ Höhe gemessen wird, ausströmen. Die Dichtigkeit der Luft bei der Temperatur 0^0 und unter einem Drucke von $0^m,76$ ist 770mal kleiner als diejenige des Wassers und folglich 10472mal kleiner als die des Quecksilbers. Da die Luft, welche wir hier zu betrachten haben, unter einem Drucke von $0^m,77$ steht, so ist ihre Dichtigkeit etwas grösser; nach dem *Mariotte*'schen Gesetz (§. 305) ist diese Dichtigkeit blos 10336mal kleiner als die des Quecksilbers. Damit eine Flüssigkeit von derselben Dichtigkeit, wenn sie in einem oben offenen Gefäss enthalten ist, im Niveau der Ausflussöffnung einen Druck von $0^m,01$ Quecksilberhöhe ausübt, muss ihre freie Oberfläche $103^m,36$ über dieser Oeffnung gelegen sein (Tab. 8). Ihre Ausflussgeschwindigkeit beträgt also 45^m in der Secunde, und dies ist zu gleicher Zeit die Ausflussgeschwindigkeit der Luft, welche wir betrachten.

Man sieht aus diesem Beispiel, dass schon ein sehr geringer Ueberdruck eine sehr bedeutende Ausflussgeschwindigkeit hervorbringt. Es ist dies daraus zu erklären, dass die Masse des Gases, welches durch diesen Ueberdruck in Bewegung gesetzt wird, nur sehr klein ist. Ebenso sieht man, dass für einen und den nämlichen Ueberdruck von innen nach aussen die Ausflussgeschwindigkeit mit der Natur des Gases sowohl als mit dessen Temperatur wechselt: denn diese Geschwindigkeit hängt von der Dichtigkeit ab, welche das Gas vor seinem Austritt aus dem Gefäss, welches es enthält, besitzt.

§. 374. Die Menge des Gases, welche in einer bestimmten Zeit durch die Oeffnung strömt, kann ebenso wie bei den Flüssigkeiten (§. 337) erhalten werden. Angenommen, dass die Gasmoleküle die Oeffnung in einer Richtung senkrecht auf die Fläche dieser Oeffnung durchströmen, so ist klar, dass man das Volumen des in einer Secunde ausströmenden Gases erhält, indem man die Fläche der Oeffnung mit der Ausflussgeschwindigkeit multiplicirt. Das so erhaltene Volumen ist dasjenige, welches das Gas nach seinem Austritt aus der Oeffnung einnehmen würde,

wenn es dieselbe Dichtigkeit wie im Innern des Gefässes behielte. Da sich aber das Gas, indem es aus der Oeffnung tritt, in Folge der Verringerung des Druckes, dem es ausgesetzt ist, ausdehnt, so folgt daraus, dass man das oben gefundene Volumen in demselben Verhältniss vermehren muss, als sich die Spannkraft des Gases bei seinem Austritt vermindert, um das Volumen zu erhalten, welches das Gas nach seinem Austritt in Wirklichkeit einnimmt.

Wenn man die Menge des Gases, welches in einer Secunde durch eine Oeffnung in dünner Wand ausströmt, durch den Versuch bestimmt, findet man, dass sie bedeutend geringer ist als diejenige, welche wir durch die vorhergehenden Betrachtungen gefunden haben: Die wirkliche Ausflussmenge ist nur 0,65 der theoretischen. Dieser Unterschied zwischen dem Resultate der Theorie und dem des Versuchs rührt auch hier davon her, dass wir einen Fehler begingen, indem wir annahmen, dass die Gasmoleküle die Oeffnung senkrecht auf ihre Fläche durchdringen. Der Gasstrahl erleidet nach seinem Austritt aus der Oeffnung ebenso eine Zusammenziehung wie ein Flüssigkeitsstrahl (§. 337). Davon kann man sich leicht überzeugen, wenn man die im Gefäss enthaltene Luft mit Rauch vermengt; der austretende Strahl wird dann sichtbar, und es kann also seine Gestalt leicht beobachtet werden. Die Zusammenziehung des Gasstrahls ist unter denselben Verhältnissen etwas geringer als diejenige, welche ein Flüssigkeitsstrahl erleidet, weil die wirkliche Ausflussmenge im Falle eines Gases 0,65, im Falle einer Flüssigkeit nur 0,62 der theoretischen beträgt.

Wenn man an der Oeffnung, durch welche ein Gas ausströmt, ein Ansatzröhrchen anbringt, so werden dadurch die Verhältnisse, unter denen der Ausfluss stattfindet, bedeutend modificirt; diese Aenderungen erklären sich genau auf dieselbe Weise wie bei den Flüssigkeiten (§. 340). Mit einem cylindrischen Ansatzröhrchen erhält man eine wirkliche Ausflussmenge, welche 0,93 der theoretischen ist. Wenn man ein schwach conisches und convergentes Ansatzröhrchen anwendet, so erhebt sich die wirkliche Ausflussmenge auf 0,94 der theoretischen, letztere mit Zugrundelegung der Ausmündung des Ansatzröhrchens berechnet.

§. 375. **Bewegung der Gase in Röhren.** — Wenn sich ein Gas im Innern einer Röhre bewegt, so erfährt es von Seite der Wände derselben einen Widerstand ähnlich demjenigen, von dem wir bei den Flüssigkeiten gesprochen haben (§. 352). Dieser Widerstand ist proportional der Grösse der Wandfläche, an welcher

das Gas gleitet. Er ändert sich ausserdem mit der Geschwindigkeit des Gases, aber er kann hier, unähnlich dem, was bei den Flüssigkeiten stattfindet, als proportional dem Quadrate der Geschwindigkeit des Gases betrachtet werden. Dieses Gesetz, welches den Zusammenhang zwischen dem Widerstande an den Röhrenwänden und der Geschwindigkeit des Gases ausdrückt, hat sich für alle die Geschwindigkeiten, von 3^m bis 50^m in der Secunde, welche die Gase gewöhnlich in den Leitungsröhren annehmen, bestätigt.

Durch Kniee, sowie durch Verengungen in den Röhren, welche ein Gas durchströmt, wird ein bedeutender Widerstand gegen die Bewegung des Gases hervorgebracht. Um solche Widerstände absichtlich hervorbringen und dadurch die Geschwindigkeit des Gases mässigen zu können, bringt man in den Rauchrohren der Oefen eine Klappe wie sie in Fig. 494 (Seite 713) dargestellt ist, in anderen Gasleitungsröhren einen Hahn (Fig. 493, S. 712) an, u. s. f.

§. 376. Das Gas, welches in den Städten zur Beleuchtung gebraucht wird (Leuchtgas), wird zuerst in ein grosses Reservoir geleitet, welches Gasometer genannt wird, und von welchem aus es zu den verschiedenen Brennern gelangt, indem es eine Röhrenleitung durchströmt, die unter dem Pflaster der Strassen angebracht ist. Ein solcher Gasometer besteht aus nichts weiter als aus einer Glocke von Eisen- oder Kupferblech, welche in ein grosses Bassin, das mit Wasser gefüllt ist, eintaucht (Fig. 500). Das Gas wird von dem Orte, wo es bereitet wird, durch eine Röhre, welche in das Bassin eintritt und sich vertikal in demselben erhebt, bis sich ihre Mündung über dem Niveau, welches das Wasser erreichen kann, befindet, unter die Glocke geleitet. Aus dieser aber kann es nirgends entweichen: seitwärts und von oben ist es von den cylindrischen Wänden und dem Deckel der Glocke eingeschlossen, unten aber von dem Wasser des Bassin's, mit welchem es in Berührung steht. Das Gewicht der Glocke ist zum grössten Theil durch Ketten, welche, an ihrem obersten Theil befestigt, über Leitrollen gehen und sich in Gegengewichten endigen, im Gleichgewicht gehalten. Der übrige Theil des Gewichtes der Glocke übt einen Druck auf das eingeschlossene Gas aus, welches seinerseits wieder in Folge der erhöhten Spannkraft, die ihm dadurch gegeben wird, gegen die Glocke drückt und sie vollends in's Gleichgewicht setzt. Zugleich drückt es aber auch auf das Wasser des Bassin's, sodass dieses etwas aus der Glocke getrieben wird und sich ausserhalb der Glocke etwas höher stellt als in derselben. Der Druck, welcher aus diesem

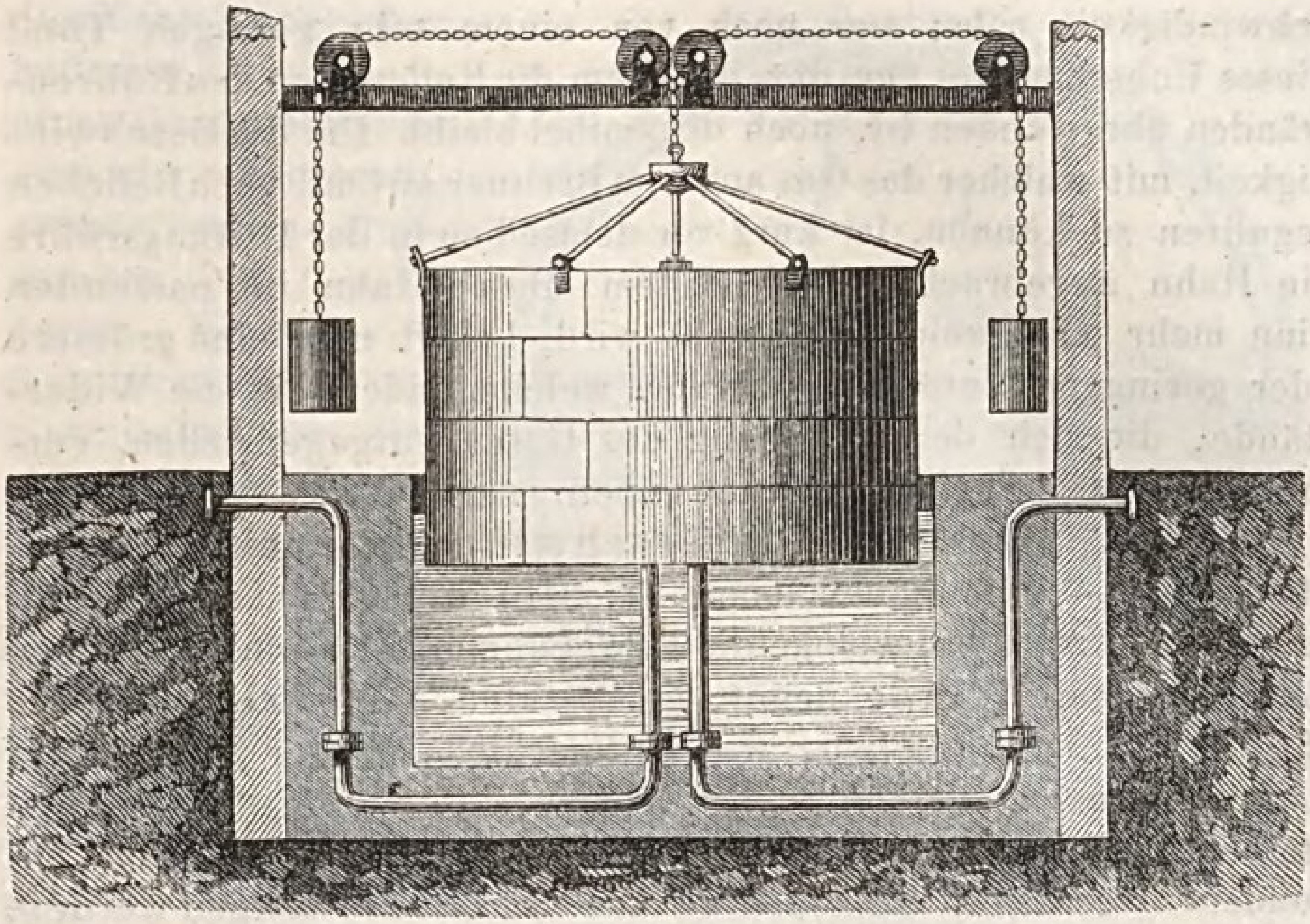


Fig. 500.

Niveauunterschiede entspringt, muss offenbar gleich dem Ueberschuss des Druckes des Gases im Gasometer über den der atmosphärischen Luft sein. (Der Druck der atmosphärischen Luft, den die Glocke von aussen zu erleiden hat, und der, welcher auf der freien Oberfläche des Wassers im Bassin lastet, heben sich gegenseitig auf.)

Die Gegengewichte, welche einem Theil des Gewichtes der Glocke das Gleichgewicht halten, sind so bestimmt, dass der Niveauunterschied des Wassers im Bassin innerhalb und ausserhalb der Glocke nicht mehr als einige Centimeter beträgt. Der dadurch gemessene Ueberdruck des Gases im Gasometer nöthigt dasselbe durch eine zweite Röhre, welche ganz so wie die erste, durch welche das Gas eingeleitet wird, im Innern der Glocke angebracht ist, aus dem Gasometer auszutreten. Von dieser Röhre aus vertheilt es sich in die verschiedenen Zweige der Leitung, in welchen es zu den Oeffnungen geleitet wird, bei denen es brennend ausströmen soll. Der Ueberschuss des Druckes des Gases im Gasometer über den der atmosphärischen Luft, so gering er auch ist, würde dennoch an den Brennern eine grosse Ausflussgeschwindigkeit hervorbringen, wenn nicht die Röhren der Bewegung des Gases einen grossen Widerstand entgegensetzen würden; so aber wird jener Ueberdruck fast gänzlich zur Ueberwindung dieser Widerstände angewandt, und die Ausflussge-

schwindigkeit rührt nur noch von einem sehr geringen Theil dieses Ueberdruckes her, der, nachdem die Reibung an den Röhrenwänden überwunden ist, noch disponibel bleibt. Um die Geschwindigkeit, mit welcher das Gas aus dem Brenner strömt, nach Belieben reguliren zu können, ist kurz vor demselben in der Leitungsröhre ein Hahn angebracht. Je nachdem dieser Hahn im passenden Sinn mehr oder weniger gedreht wird, bringt man eine grössere oder geringere Verengung hervor, welche, indem sie die Widerstände, die sich der Bewegung des Gases entgegenstellen, vermehrt, die Geschwindigkeit desselben vermindert.

§. 377. **Messung der Geschwindigkeit eines Luftstroms.** — Wir haben oben (§. 316) in Kürze die Hauptursachen angegeben, welche die Bewegungen der atmosphärischen Luft, die man Winde nennt, hervorrufen. Wir haben alsdann (§§. 317 u. 318) gesehen, wie Unterschiede in der Temperatur Luftströmungen im Innern der Bergwerke wie in den Schornsteinen erzeugen. In anderen Fällen wird die Luft durch besondere Maschinen, mit denen wir uns später beschäftigen werden, in Bewegung gesetzt. Es ist häufig nothwendig, die Geschwindigkeit eines solchen Luftstromes, auf welche Art er auch entstanden sein mag, zu messen. Man bedient sich zu diesem Zwecke des Anemometers oder Windmessers von *Combes*. Dies ist ein dem Woltmann'schen Flügel, der in Fig. 498 (S. 728) abgebildet ist, ganz ähnliches Instrument, welches sehr leicht construirt und dem speziellen Gebrauch, zu welchem es gehört, angepasst ist. Die Anwendung des Instruments ist übrigens ganz ähnlich wie bei dem Woltmann'schen Flügel.

Die Tabelle 5 (S. 24) gibt die Geschwindigkeit, welche die Luftmoleküle bei den verschiedenen Arten der Winde besitzen.

§. 378. **Die Gasuhr.** — Das Bedürfniss, die Menge des Gases, welches eine Rohrleitung durchströmt, zu messen, ist besonders fühlbar geworden, seit die Leuchtgasfabriken sich allgemeiner verbreitet haben und das Gas an die Consumenten dem Volumen nach verkaufen. Das hiezu dienende Instrument ist die Gasuhr (Compteur), welche in die Rohrleitung eingeschaltet wird und ihrer wesentlichen Einrichtung nach zunächst in den Figuren 501^a und 501^b in zwei auf einander senkrechten Durchschnitten schematisch dargestellt ist.

Innerhalb eines Gehäuses *a a* von Blech, in welches die beiden Röhren *c* und *m* einmünden, das sonst aber überall verschlossen ist, dreht sich die cylindrische Trommel *b b*. Diese Trommel ist an ihren beiden Grundflächen gleichfalls verschlossen, in

der Mantelfläche aber befinden sich vier, je einen Quadranten von einander entfernte, schlitzförmige Oeffnungen d, e, f, g, in deren Nähe vier Scheidewände von eigenthümlicher Gestalt an die Innenseite des Mantels angelöthet sind und das Innere der Trommel in 4 Kammern A, B, C, D theilen. Diese Kammern sind einerseits bei d, e, f, g, andererseits bei h, i, k, l offen. Gehäuse aa und Trommel bb sind bis etwas über die Hälfte mit Wasser gefüllt. Wie sich die Trommel innerhalb des Gehäuses drehen kann, ungehindert von dem Rohre c und ohne dass der luftdichte Abschluss um die Drehungsachse herum gestört wird, und wie dieser Abschluss besonders mit Hilfe des Wassers möglich ist, zeigt deutlich die Figur 501[b].

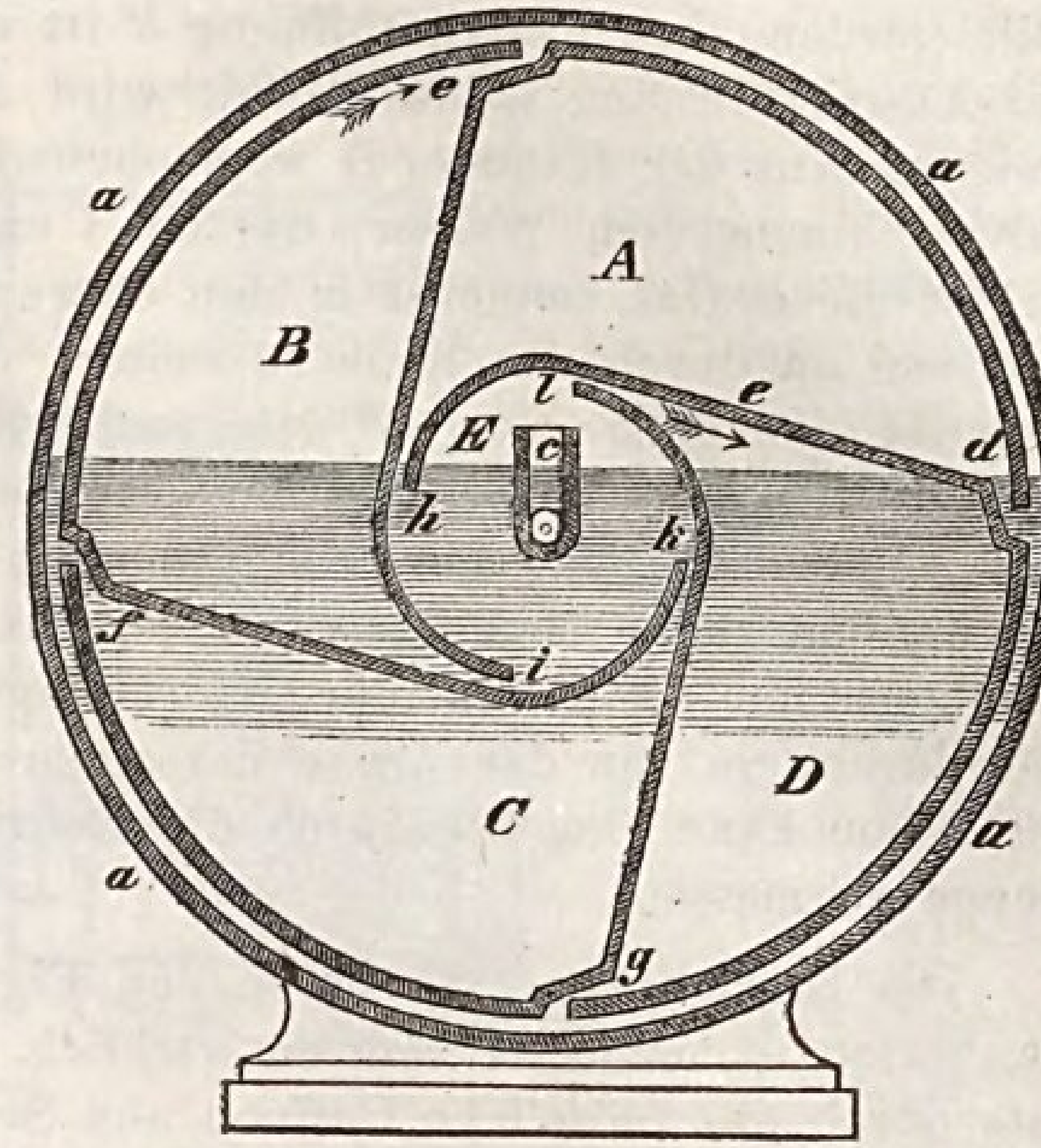


Fig. 501[a].

Durch das Rohr c tritt das Gas in die Gasuhr ein, und zwar zunächst in den Raum E innerhalb der Trommel. Hier findet sie immer eine der Oeffnungen h, i, k, l, in der in der Figur gezeichneten Stellung der Trommel die l, durch welche es in eine der 4 Kammern, hier D, eintreten kann. Diese hebt sich dadurch wie eine Glasglocke, in welche Gas eingetrieben wird, aus dem Wasser, wodurch die Trommel gedreht wird. Die zunächst vorhergehende Kammer A ist zuletzt ganz mit Gas ge-

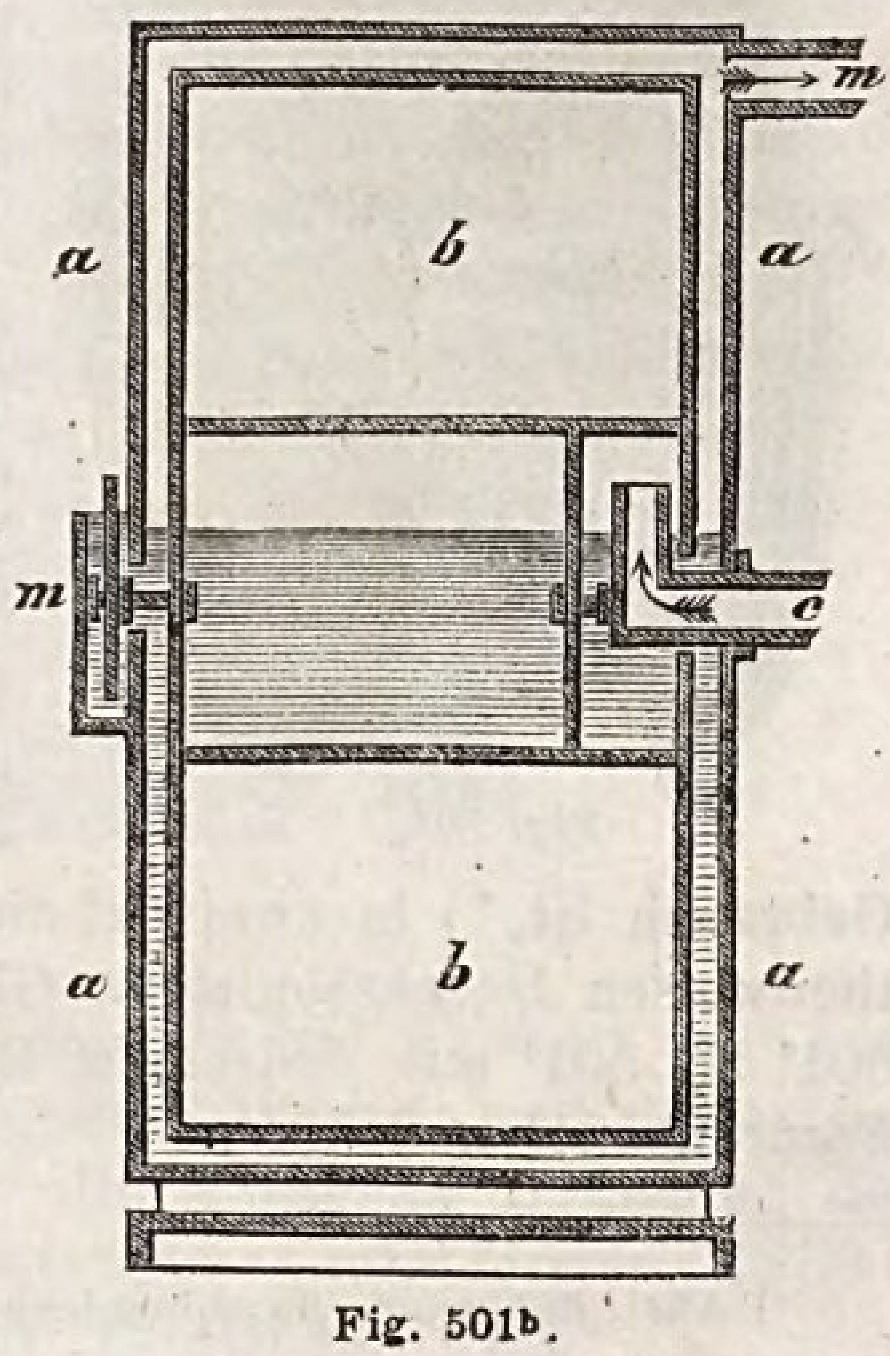


Fig. 501[b].

füllt worden, ihre Eintrittsöffnung *h* ist eben untergetaucht und die Austrittsöffnung *d* des Gases wird sofort aus dem Wasser steigen. Aus der Kammer B wird oben das Gas durch die Oeffnung *e* hinaus vom Wasser, das bei *i* eindringt, verdrängt. Es strömt dieses Gas zunächst in den oberen Theil des Gehäuses *a a* und von da durch das Rohr *m* weiter. Die Kammer C endlich befindet sich ganz unter Wasser und wird nach der D mit Gas gefüllt. Für jede Umdrehung der Trommel wird also ein Volumen Gas gleich dem Inhalt der vier Kammern in diese ein- und wieder ausgeströmt sein. Man darf also bei bekanntem Inhalt der vier Kammern nur die Anzahl der Umdrehungen der Trommel zählen, was durch ein von der Achse derselben getriebenes Zählerwerk geschehen kann, um die durch die Rohrleitung gegangene Gasmenge zu messen.

Die Einrichtung, wie sie in den Figg. 501ª u. 501ᵇ skizzirt ist, hatten die ersten Gasuhren wirklich. Sie hat den Nachtheil, dass durch das plötzliche Oeffnen und Schliessen der Oeffnungen der Kammern Schwankungen im Wasserstand hervorgerufen werden, die einem stetigen Durchfluss des Gases hinderlich sind.

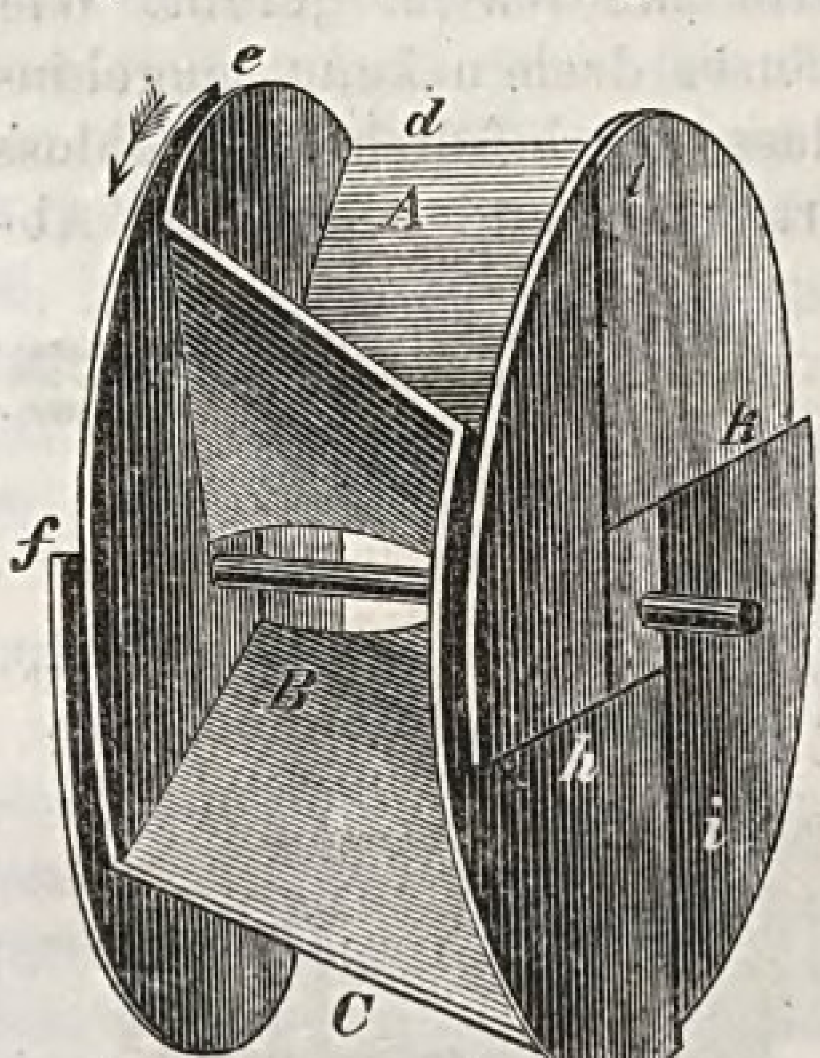


Fig. 501_c.

Man war darauf bedacht, dieses Oeffnen und Schliessen allmählich vor sich gehen zu lassen, und hat desshalb den Scheidewänden der Kammern die in Fig. 501^c abgebildete Gestalt gegeben; in dieser Figur hat man sich den Mantel der Trommel abgenommen gedacht; auf Seite der Eintrittsöffnungen *h*, *i*, *k*, *l* schliesst sich ein gewölbter Boden an diesen Mantel an, auf Seite der Austrittsöffnungen *d*, *e*, *f*, *g* ist die Trommel jetzt ganz offen. Die Figuren 501^d und 501^e zeigen die Gasuhr, wie sie heutzutage fast allgemein im Gebrauch ist,*) in zwei auf einander senkrechten Ansichten und theilweisen Durchschnitten. Gleiche Theile sind in den Figuren 501^c bis 501^e mit denselben Buchstaben gezeichnet wie in den Figuren 501^a und 501^b.

*) Aus „*Rühlmann*, Maschinenlehre“, I. Bd., S. 123.

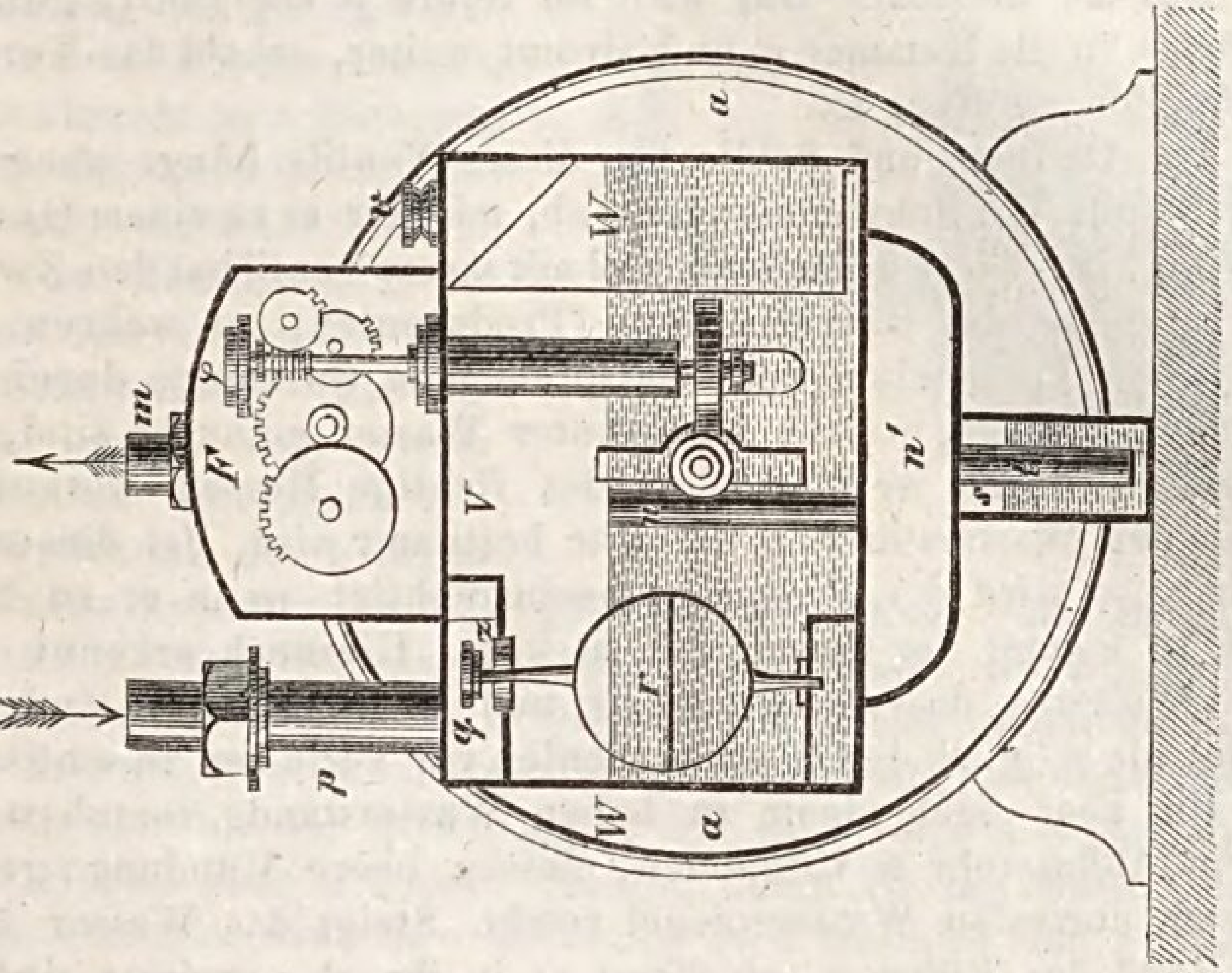


Fig. 501e.

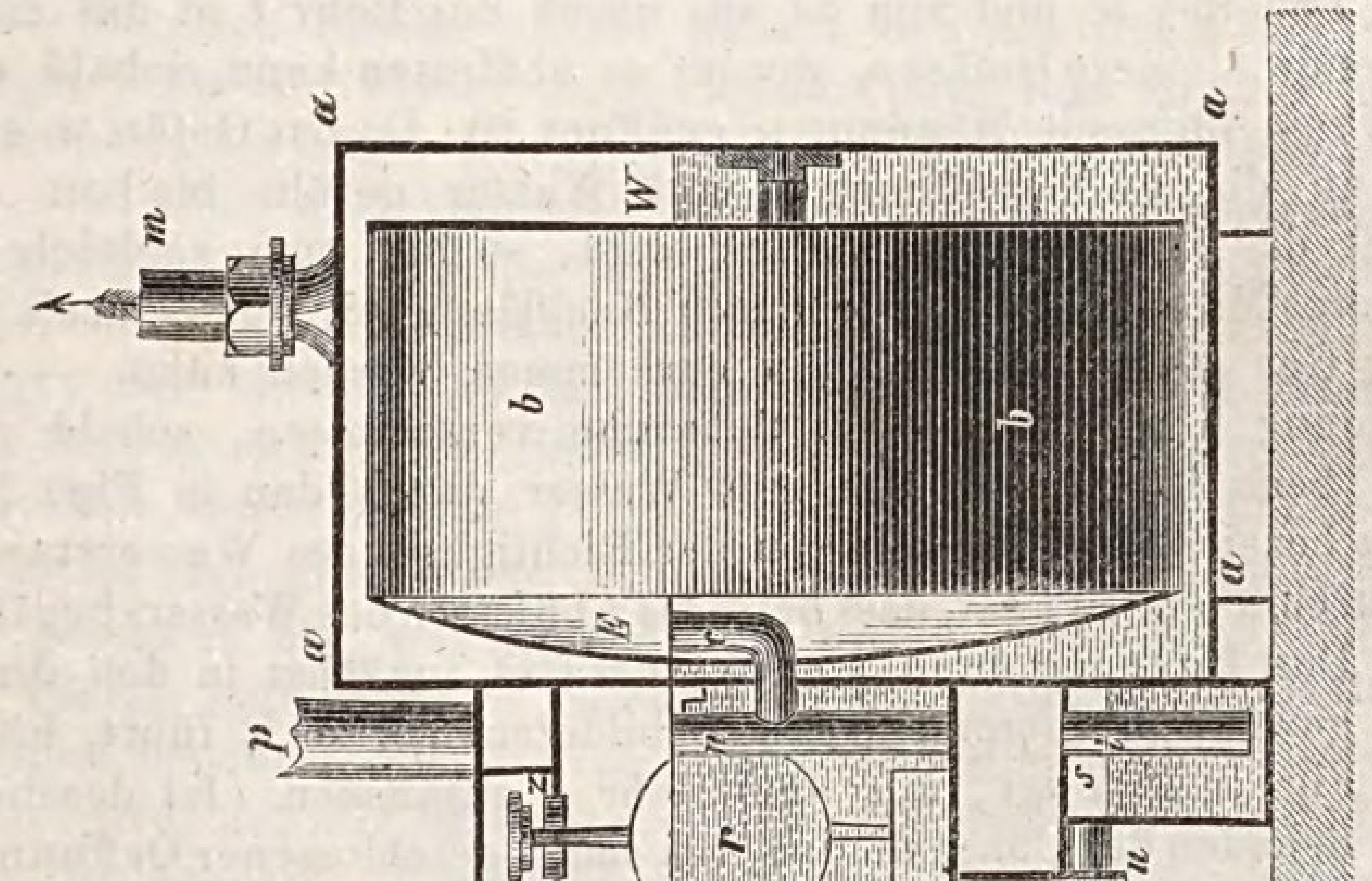


Fig. 501d

Der prismatische, kastenförmige Vorbau V dient zur Aufnahme von Sperr- und Regulirungsmechanismen und derjenigen Räder und Schrauben, wodurch die drehende Bewegung der Messtrommel auf das in dem besonders aufgesetzten kleinen Kästchen F befindliche Zählerwerk übertragen wird.

Das zu messende Gas wird im Rohre p zugeführt, gelangt zunächst in die Kammer q und strömt weiter, sobald das Ventil z hinlänglich geöffnet ist.

Das Oeffnen und Schliessen dieses Ventils hängt aber von dem Stande der Schwimmkugel r ab, mit der es zu einem Ganzen vereinigt ist. Diese Schwimmkugel mit ihrem Ventil hat den Zweck, das Interesse des Gasverkäufers (Producenten) zu wahren. Da die jedem Trommelumgange entsprechende Gasmenge durch die Räume derselben, welche nicht unter Wasser getaucht sind, bestimmt wird, so ist klar, dass das richtige Messen wesentlich durch den Wasserstand in der Uhr bestimmt wird. Ist dieser zu niedrig, so wird der Producent beeinträchtigt, wenn er zu hoch wird, so kommt der Consument zu kurz. Hiernach erkennt man ohne Weiteres, dass Schwimmer r und Ventil z Mittel sind, um so viel als möglich den Gasproducenten vor Verlusten zu schützen.

Um aber auch einem zu hohen Wasserstande vorzubeugen, ist ein Abflussrohr n vorhanden, dessen obere Mündung genau bis zum normalen Wasserspiegel reicht. Steigt das Wasser über den Rand der Röhre n, so fliesst es in ihr ab, ergiesst sich in den Behälter n' und von da aus durch das Rohr t in das tiefer liegende kleinere Gefäss s, woraus es abfliessen kann, sobald eine ins Freie führende Mündung u geöffnet ist. Da das Gefäss s stets bis an die Ausflussöffnung u mit Wasser gefüllt bleiben und somit das Rohr t untertauchen wird, so hat man zugleich ein sicheres Mittel, dass weder durch Nachlässigkeit noch durch Betrug Gas aus der Mündung u entnommen werden kann. — Die Oeffnung u wird mit einer Schraube verschlossen, sobald man sich beim Füllen der Uhr mit Wasser durch den in Fig. 501^{c} mit v bezeichneten Einguss von der Richtigkeit des Wasserstandes dadurch überzeugt hat, dass bei u das Abfliessen des Wassers beginnt.

Das Eintrittsrohr c, welches das Gas zunächst in den durch den gewölbten Trommeldeckel gebildeten Vorhof E führt, hängt wie Fig. 501^{d} zeigt, mit dem Rohr n zusammen. Ist desshalb, zum Schaden des Consumenten, bei schon geschlossener Oeffnung u zu viel Wasser bei v eingegossen worden, so füllt sich das heberartige Rohrstück, das von n nach c herübergeht, mit Wasser und versperrt dem Gase den Weg gänzlich.

§. 379. **Druck eines Flüssigkeitsstrahls gegen eine Fläche.** — Wenn ein Flüssigkeitsstrahl einer Fläche A B (Fig. 502) begegnet, welche sich der Fortsetzung seiner Bewegung entgegensetzt, so breitet er sich auf dieser Fläche aus, und diese hat einen gewissen Druck von ihm auszuhalten. Nehmen wir zu-

nächst an, dass es sich um eine ebene Fläche handle, die senkrecht zur Richtung des Strahls gestellt ist. Die Grösse dieser Fläche ist offenbar von Einfluss auf die Grösse des Druckes, welchen sie erfährt. Man begreift leicht, dass dieser Druck, der allein von der Gegenwirkung der Flüssig-

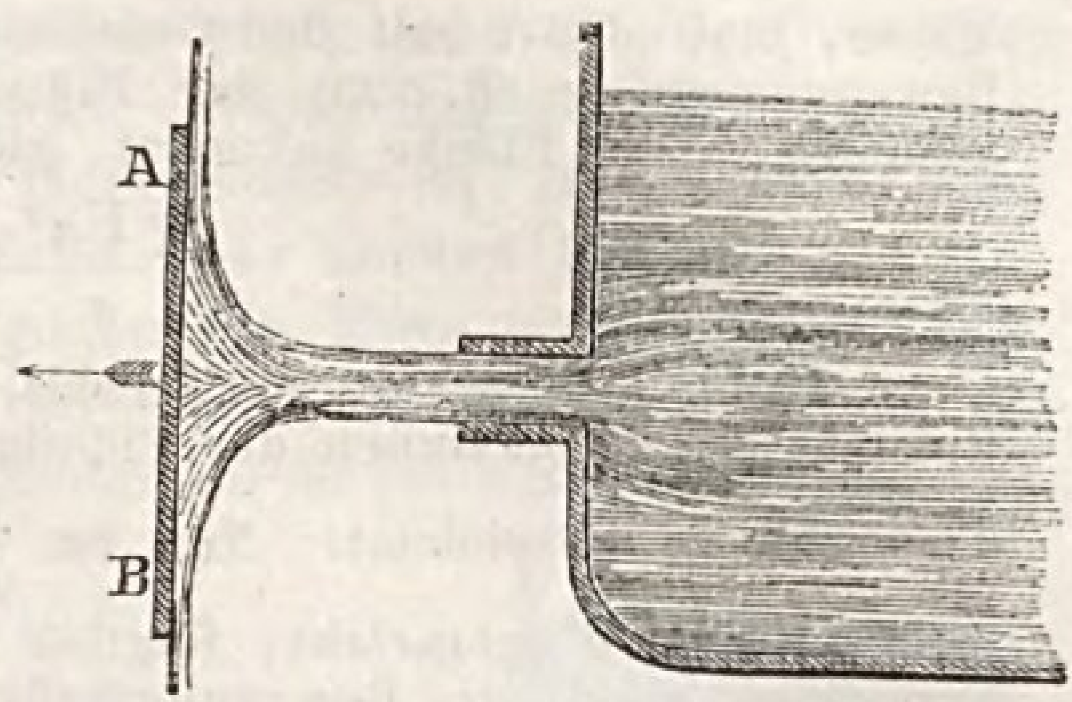


Fig. 502.

keitsfäden herrührt, welche gezwungen werden, ihre Richtung plötzlich zu ändern, um so grösser sein muss, je grösser die Aenderung ist, welche die Bewegung dieser Flüssigkeitsfäden zu erleiden hat. Wenn die Fläche, gegen welche die Flüssigkeit trifft, nicht breiter als der Strahl selbst ist, so werden sich die Flüssigkeitsfäden wohl krümmen müssen, damit sie um diese Fläche herum kommen, aber ihre Richtung wird nicht so viel geändert werden, als es geschieht, wenn die Fläche grösser ist. In dem Maasse als diese Fläche wächst, nähern sich die Richtungen der Flüssigkeitsfäden, welche rings herum über ihre Ränder hinwegströmen, der Lage, wo sie parallel zu der Fläche selbst sind und es ist klar, dass man erst dann, wenn dieser Parallelismus vollständig erreicht ist, das Maximum des Druckes erhält, den der Strahl gegen diese Fläche ausüben kann. Der Versuch hat gezeigt, dass dieser Fall erst dann eintritt, wenn die Fläche, gegen welche der Strahl stösst, 6 bis 8mal so gross ist als der Querschnitt dieses Strahls.

Indem man den Druck, welcher gegen die Fläche ausgeübt wird, gemessen hat, was mittelst einer Feder, gegen welche sich diese Fläche stützt, leicht geschehen kann, hat man gefunden, dass derselbe durch das Gewicht eines Flüssigkeitscylinders dargestellt wird, der zur Basis den Querschnitt des Strahls und zur Länge die doppelte Druckhöhe hat, welche der Geschwindigkeit der Moleküle des Flüssigkeitsstrahls entspricht (§. 115).

Es ist nicht schwer, sich von der Richtigkeit dieses Resultats auch auf theoretischem Wege Ueberzeugung zu verschaffen. Das Volumen der Flüssigkeitsmasse, welche während einer Secunde gegen die Fläche anstösst, ist offenbar gleich dem Produkte aus dem Querschnitte des Strahls in die Geschwindigkeit desselben; die Masse dieser Flüssigkeitsmenge erhält man folglich, wenn man ihr Volumen mit dem Gewichte der Cubikeinheit der Flüssigkeit multiplicirt, und durch die Beschleunigung der Schwere dividirt. Diese

Masse, multiplicirt mit der Geschwindigkeit des Strahls, gibt die Bewegungsgrösse (§. 123) der Flüssigkeit, welche während einer Secunde an der Fläche ankommt, gleich

$$\frac{\gamma F v^2}{g},$$

wenn F den Querschnitt des Strahls, v seine Geschwindigkeit, γ das Gewicht der Cubikeinheit der Flüssigkeit und g die Beschleunigung der Schwere bezeichnet. Nun ist $\frac{v^2}{2g}$ die Höhe, welche der Geschwindigkeit v entspricht; folglich kann, wenn diese Höhe mit h bezeichnet wird, die Bewegungsgrösse auch durch $\gamma F . 2h$ ausgedrückt werden. Dieselbe wird bei den gemachten Voraussetzungen in jeder Secunde durch den Widerstand der Fläche vollständig vernichtet. Dieser Widerstand, und folglich auch umgekehrt der Druck, welchen der Flüssigkeitsstrahl gegen die Fläche ausübt, ist also einer Kraft gleich zu achten, die, mit der Zeit ihrer Wirksamkeit (hier 1 Secunde) multiplicirt, jene Bewegungsgrösse gibt. Der in Rede stehende Druck ist also gleich $\gamma F' . 2h$, d. h. gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule, welche den Querschnitt des Strahls zur Basis und die doppelte Druckhöhe, welche der Geschwindigkeit des Strahls entspricht, zur Länge hat.

Da die Höhe, welche einer gewissen Geschwindigkeit entspricht, proportional dem Quadrate dieser Geschwindigkeit ist (§. 115), so kann man auch sagen, dass der Druck, welchen ein Flüssigkeitsstrahl auf eine ebene Fläche, die senkrecht zu seiner Richtung gestellt und hinreichend gross ist, ausübt: 1) proportional dem Querschnitt des Strahls und 2) proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit der Flüssigkeitsmoleküle ist, aus welchen derselbe besteht. Und dieses Resultat ist auch sehr einleuchtend, wenn man bedenkt, dass 1) ein Strahl von doppeltem Querschnitt bei derselben Geschwindigkeit die doppelte Anzahl von Molekülen in einer bestimmten Zeit gegen die Fläche sendet, und dass 2) bei einem Strahl von gleichem Querschnitt, aber der doppelten Geschwindigkeit in derselben Zeit nicht nur doppelt so viele Moleküle gegen die Fläche stossen, sondern dass jedes derselben auch die doppelte Geschwindigkeit besitzt und daher auch die doppelte Wirkung ausübt.

§. 380. Wenn die Fläche, gegen welche der Flüssigkeitsstrahl trifft, nicht eben ist, so hängt der Druck, welcher gegen sie ausgeübt wird, auch noch von ihrer Form ab. Dieser Druck ist grösser oder kleiner, je nachdem die Fläche den Strahl eine grössere oder geringere Richtungsänderung anzunehmen nöthigt. Wenn die Fläche nach der Seite des Strahls hin convex ist, so werden die Flüssigkeitsfäden weniger stark von ihrer Richtung abgelenkt als bei einer ebenen Fläche; desshalb wird auch der

auf sie ausgeübte Druck weniger stark sein als der, welcher einer ebenen Fläche entspricht. Wenn dagegen die von dem Flüssigkeitsstrahl getroffene Fläche concav ist, so wird der Druck auf sie grösser als in dem Falle einer ebenen Fläche.

Wenn z. B. der Strahl gegen die Mitte einer hohlen Halbkugel (Fig. 503) stösst, so strömen, wie leicht zu sehen, die Flüssigkeitsfäden über die Ränder dieser Halbkugel mit einer Geschwindigkeit, gleich und entgegengesetzt derjenigen, welche sie vor dem Zusammentreffen mit der Fläche hatten. Jeder dieser Flüssigkeitsfäden ändert zunächst seine Richtung so lange, bis sie senkrecht zu seiner ursprünglichen Richtung wird, ebenso wie wenn er einer ebenen Fläche begegnet wäre; von da an aber erfährt der Faden die nämliche Richtungsänderung nochmals, nur in entgegengesetztem Sinne, bis er endlich parallel zur Achse des Strahls wird und sich in entgegengesetzter Richtung bewegt; in dieser zweiten Periode übt der Faden offenbar die nämliche Wirkung nochmals gegen die Fläche aus wie in der ersten. Der Gesammtdruck, welchen die Hohlkugel erfährt, wird also doppelt so gross sein wie derjenige, den eine ebene Fläche zu tragen hat, welche die Wirkung des nämlichen Strahls in senkrechter Richtung empfängt. Der Versuch bestätigt dieses Resultat.

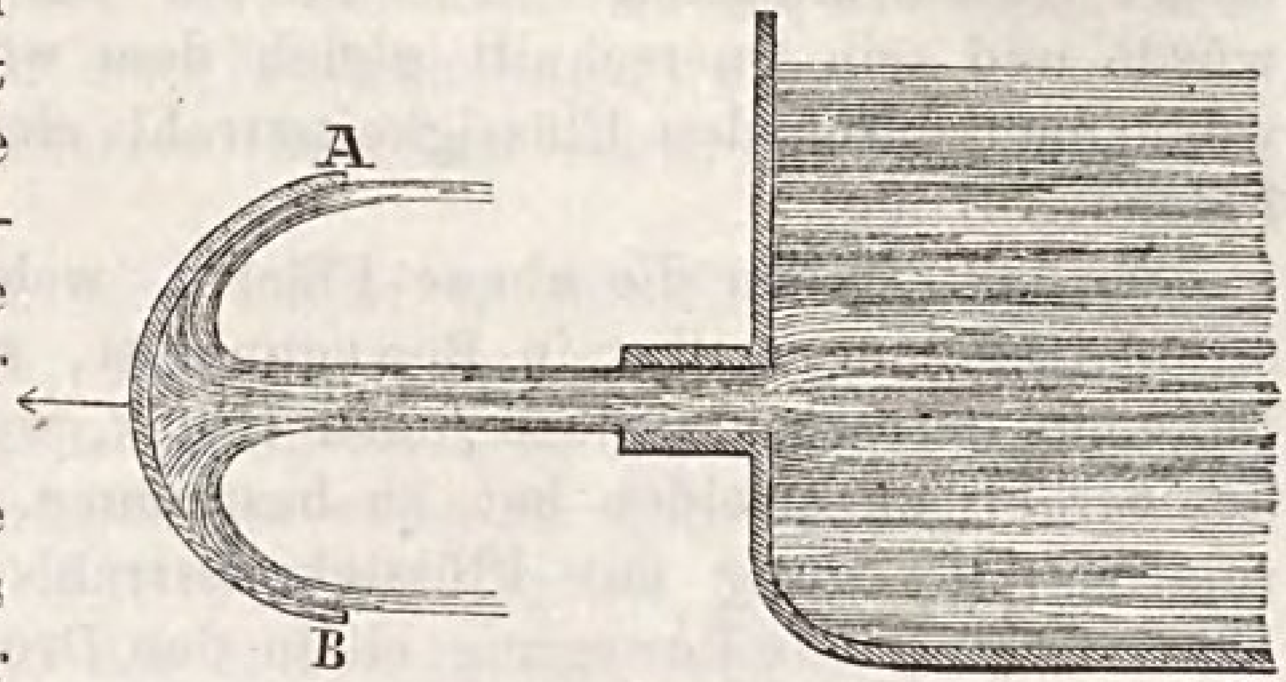


Fig. 503.

§. 381. Wenn ein Flüssigkeitsstrahl einer ebenen Fläche AB (Fig. 504) begegnet, die sich ihm in schiefer Richtung darbietet, so ist der Druck, welcher auf diese Fläche ausgeübt wird, nicht mehr derselbe, als wenn sie der Strahl in senkrechter Richtung treffen würde. Die Geschwindigkeit CD des Strahls kann als Resultante zweier Geschwindigkeiten

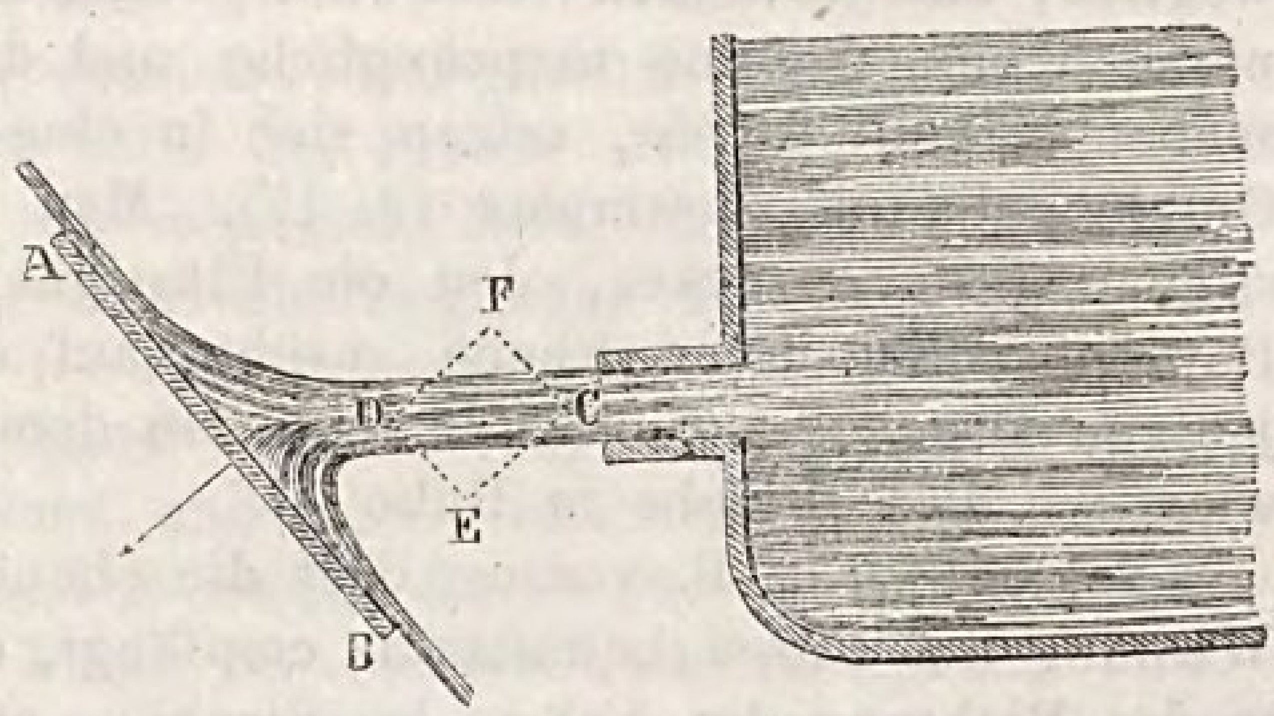


Fig. 504.

CE, CF (§. 17) betrachtet werden, von denen die eine senkrecht zur Ebene AB, die andere parallel dazu ist. In Folge der Geschwindigkeit CF allein würden sich die Flüssigkeitsfäden blos parallel der Ebene AB fortbewegen, ohne irgend einen Druck gegen diese Ebene ausüben zu können. Der Druck, welchen die Ebene zu erleiden hat, rührt also allein von der Geschwindigkeit CE her; er ist derselbe als wenn sich der Strahl mit dieser Geschwindigkeit CE senkrecht zur Fläche AB bewegen würde und sein Querschnitt gleich dem wäre, den man erhält, wenn man durch den Flüssigkeitsstrahl eine Ebene parallel zur Fläche AB legt.

§. 382. Wenn die ebene Fläche, welcher ein Flüssigkeitsstrahl begegnet, selbst in Bewegung ist, so gelangt man durch folgende Betrachtung dazu, den Druck, welchen sie von Seiten des Strahls zu erleiden hat, zu bestimmen. Es ist klar, dass die relative Bewegung des Flüssigkeitsstrahls im Verhältniss zur Fläche — welche Bewegung allein den Druck, den diese Fläche empfängt, bestimmt — nicht im Geringsten geändert wird, wenn man dem Flüssigkeitsstrahl und der Fläche zusammen eine gemeinschaftliche Bewegung ertheilt; wenn sich das Gefäss, aus welchem der Flüssigkeitsstrahl hervorströmt, und die Fläche, auf welche er stösst, auf einem Schiffe befinden, so ist offenbar der durch den Strahl ausgeübte Druck derselbe, ob das Schiff in Ruhe ist, oder ob es sich in der einen oder anderen Richtung bewegt. Man kann also annehmen, dass dem Flüssigkeitsstrahl und der beweglichen Ebene, welcher er begegnet, eine gemeinschaftliche Geschwindigkeit ertheilt werde, die gleich und entgegengesetzt der Geschwindigkeit der Ebene ist. Der Druck der Flüssigkeit gegen die Ebene wird dadurch nicht im Geringsten geändert. Aber da nun die Ebene zwei gleiche und entgegengesetzte Geschwindigkeiten zugleich besitzt, so bleibt sie unbeweglich; und die beiden Geschwindigkeiten des Flüssigkeitsstrahls, nämlich einmal seine ursprüngliche und dann die, welche ihm soeben ertheilt wurde, setzen sich in eine einzige Resultanten-Geschwindigkeit zusammen (§. 17). Man hat folglich die Bestimmung des Druckes, den ein Flüssigkeitsstrahl auf eine in Bewegung begriffene Ebene ausübt, auf die Bestimmung desjenigen Druckes zurückgeführt, der in dem Fall hervorgebracht wird, wo diese Fläche in Ruhe ist.

Setzen wir z. B. voraus, dass die ebene Fläche, welche die Wirkung des Flüssigkeitsstrahls empfängt, eine Geschwindigkeit in der Richtung der Achse des Strahles und im Sinne der Be-

wegung der Flüssigkeit besitze, oder dass mit anderen Worten die Fläche vor der Flüssigkeit zurückweiche. Es ist klar, dass in diesem Fall die Geschwindigkeit der Flüssigkeitsmoleküle grösser sein muss als die der Fläche, wenn auf diese letztere ein Druck hervorgebracht werden soll. Indem man nun das, was wir soeben im Allgemeinen gesagt haben, auf diesen speciellen Fall anwendet, sieht man leicht, dass der Druck, welchen die ebene Fläche zu erleiden hat, der nämliche ist, als wenn diese Ebene still stände und der Flüssigkeitsstrahl nur eine Geschwindigkeit gleich der Differenz zwischen seiner eigenen und der der Ebene besässe.

Wenn die Ebene noch immer in der Richtung der Achse des Flüssigkeitsstrahls, aber in entgegengesetztem Sinne der Bewegung dieses Strahls fortschreitet, so ist der Druck, welchen sie zu tragen hat, derselbe als wenn sie unbeweglich wäre und der Flüssigkeitsstrahl eine Geschwindigkeit gleich der Summe seiner eigenen und der der Ebene besässe (vgl. §. 18).

§. 383. **Druck, welchen ein Körper erleidet, der in eine in Bewegung begriffene Flüssigkeit eingetaucht ist.** Wenn eine ebene Fläche AB (Fig. 505) mitten in eine Flüssigkeitsmasse getaucht ist, welche sich senkrecht zu dieser Fläche bewegt, so hat letztere einen Druck zu erleiden, ähnlich demjenigen, welchen ein einzelner Flüssigkeitsstrahl gegen sie ausüben würde. Die Kraft, mit welcher die Ebene gehalten werden muss, damit sie nicht der Wirkung der Flüssigkeit folgt, rührt von zwei Ursachen her: 1) die bewegte Flüssigkeit übt auf die vordere Seite der Fläche einen grösseren Druck als derjenige ist, welcher stattfinden würde, wenn die Flüssigkeit in Ruhe wäre; 2) der Druck auf die hintere Seite der Fläche wird zu gleicher Zeit vermindert, und zwar, wie man leicht sieht, in Folge von Wirbeln, welche in dem hinter der Fläche liegenden Theil der Strömung durch die Gegenwart der Fläche hervorgebracht werden.

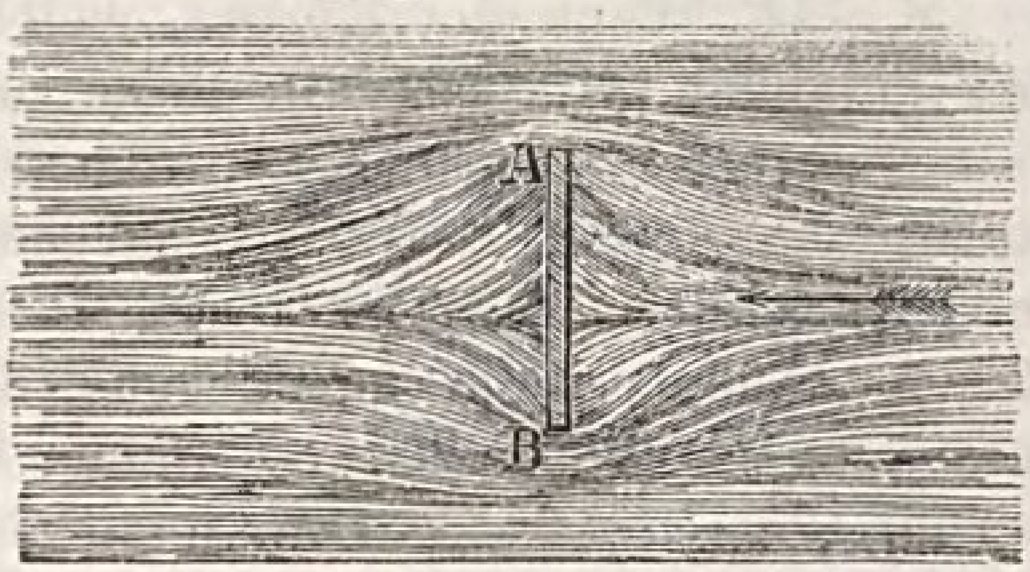


Fig. 505.

Ein Körper von irgend einer Gestalt, der in einen Strom von Flüssigkeit getaucht und darin unbeweglich festgehalten wird, erfährt aus denselben beiden Ursachen, von denen soeben die Rede war, einen Druck von Seiten der Flüssigkeit. Aber dieser Druck ändert sich bedeutend mit der Gestalt sowohl des

vorderen Theils des Körpers, desjenigen nämlich, welcher sich der Wirkung der Flüssigkeitsfäden direkt entgegensetzt, als auch des hinteren Theils, in dessen Nähe die Wirbel, von denen wir eben gesprochen haben, hervorgebracht werden.

Der Versuch zeigt, dass der in Rede stehende Druck für einen und denselben Körper proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit der Flüssigkeit und für eine und dieselbe Geschwindigkeit und ähnliche Gestalten der eingetauchten Körper proportional dem grössten Querschnitt des Körpers, senkrecht gegen die Richtung der Bewegung gemacht, ist. Wenn ein Körper nur theilweise in die Flüssigkeitsmasse eingetaucht ist, wie z. B. ein schwimmender Körper, so hat man dabei natürlich nur den Theil dieses Körpers, der unter der Oberfläche der Flüssigkeit gelegen ist, zu berücksichtigen.

Bei der nämlichen Geschwindigkeit der Flüssigkeit und dem nämlichen grössten Querschnitt des eingetauchten Körpers ist der Gesammtdruck, welchen die Flüssigkeit auf den Körper ausübt, um so geringer, je schiefere Flächen die Vorder- sowohl als die Hinterseite des Körpers der Richtung der Flüssigkeitsfäden darbieten. Ausserdem wird dieser Druck stets durch Ecken und Kanten, gegen welche sich die Flüssigkeitsfäden bewegen müssen, vergrössert.

§. 384. Wenn der Körper, welcher in eine bewegte Flüssigkeit getaucht ist, selbst in Bewegung ist, so kann man diesen Fall ganz ähnlich wie in §. 382 auf den vorigen, wo der eingetauchte Körper in Ruhe ist, zurückführen. Man darf sich nur vorstellen, dass dem Körper und der Flüssigkeit, welche ihn umgibt, zusammen eine gemeinschaftliche Bewegung, gleich und entgegengesetzt derjenigen, welche der Körper besitzt, ertheilt werde. Dieser letztere erhält dadurch zwei gleiche und entgegengesetzte Bewegungen und bleibt folglich in Ruhe, während sich die Flüssigkeit mit der Geschwindigkeit bewegt, welche aus der Zusammensetzung ihrer eigenen mit derjenigen, die ihr soeben ertheilt worden ist, hervorgeht. Man hat also den Fall, wo sich ein Körper, der in Ruhe ist, in einer bewegten Flüssigkeit befindet. Wenn sich z. B. der Körper in der nämlichen Richtung wie die Flüssigkeit, entweder im gleichen oder im entgegengesetzten Sinne bewegt, so ist der Druck, welchen er erleidet, derselbe, als wenn er in Ruhe wäre und die Flüssigkeit eine Geschwindigkeit besässe, die gleich der Differenz oder der Summe ihrer eigenen und der Geschwindigkeit des Körpers ist.

Wenn sich ein Körper in einer in Ruhe befindlichen Flüssigkeit bewegt, so erfährt er denselben Druck als wenn er in Ruhe wäre und die Flüssigkeit eine Bewegung, gleich und entgegengesetzt der seinigen, besässe. Dieser Druck, welchen ein Körper, der sich in einer Flüssigkeit bewegt, zu erleiden hat, ist es, aus welchem der Widerstand besteht, von dem wir oben (§. 170) gesprochen und dessen Gesetze wir dort in Kürze angegeben haben.

Die Kraft, welche an einem Schiffe angebracht werden muss, um es in der Bewegung, welche ihm ertheilt worden ist, zu erhalten, hat nur den Widerstand zu überwinden, welchen ihm das Wasser, in welchem es sich bewegt, entgegensetzt, sowie denjenigen, der durch die Luft hervorgerufen wird; doch ist letzterer gewöhnlich bedeutend schwächer als jener. Um die Grösse der bewegenden Kraft, welche einer gegebenen Geschwindigkeit entspricht, zu vermindern, oder auch wohl, um die Geschwindigkeit, welche eine und die nämliche bewegende Kraft hervorbringen und erhalten kann, zu erhöhen, muss man dem Schiffe eine solche Form geben, dass bei Gleichheit des eingetauchten Volumens der Widerstand gegen die Bewegung so klein als möglich wird. Diese Bedingung muss aber zugleich mit der erfüllt sein, welche wir schon oben (§. 323) angegeben haben und durch welche die Stabilität des Gleichgewichts gesichert werden soll. Um diese Zwecke zu erreichen, gibt man dem Vordertheil des Schiffes eine solche Gestalt, dass es die Wogen leicht durchschneiden kann, während man seine Flanken, sowohl nach vorn als nach hinten, abrundet, um die Vermehrung des Widerstandes, welche durch die Gegenwart von Ecken und Kanten hervorgebracht wird, zu verhindern.

Um zu zeigen, wie sehr die Form eines Schiffes von Einfluss auf den Widerstand ist, welcher sich seiner Bewegung entgegensetzt, reicht es hin, das Resultat eines Versuches anzuführen, welcher von *Bossut* angestellt worden ist. Ein Modell eines Linienschiffes und ein Prisma von derselben Länge, dessen Basis dem grössten Querschnitt des Schiffes gleich war, wurden im Sinne ihrer Länge in einem ruhig stehenden Wasser, von dem sie ein gleiches Volumen verdrängten, mit gleicher Geschwindigkeit in Bewegung gesetzt; *Bossut* fand, dass das Wasser dem Prisma einen 5mal so grossen Widerstand als dem Schiffe entgegensetzte.

385. Druck eines bewegten Gases auf einen Körper. — Ein Gasstrahl, welcher einer feststehenden oder bewegten Fläche begegnet, übt einen Druck gegen dieselbe aus, ähnlich

demjenigen, welcher unter denselben Umständen durch einen Flüssigkeitsstrahl hervorgebracht wird; er befolgt auch die nämlichen Gesetze wie dieser (§§. 379—382), und es besteht überhaupt kein wesentlicher Unterschied zwischen beiden als der, dass der Druck, welcher durch einen Gasstrahl hervorgebracht wird, gewöhnlich viel schwächer ist, als wenn es sich um eine Flüssigkeit handelt, was aus der geringen Masse der Gasmenge, welche in einer bestimmten Zeit gegen die Fläche stösst, leicht erklärlich ist.

Ein Körper, welcher sich mitten in einer bewegten Gasmasse befindet, erfährt gleichfalls einen Druck, ähnlich demjenigen, welcher stattfinden würde, wenn das Gas durch eine ebenfalls in Bewegung begriffene Flüssigkeit ersetzt wäre. Dieser Druck, welcher zu einem Widerstande gegen die Bewegung in dem Fall wird, wo sich ein Körper inmitten eines in Ruhe befindlichen Gases bewegt, ist ebenfalls noch denselben Gesetzen unterworfen (§§. 383 und 384), als wenn er durch eine Flüssigkeit hervorgebracht würde.

§. 386. **Widerstand der Luft beim Fall der Körper.** Wir haben im §. 110 gesehen, dass, wenn die Körper in freier Luft nicht sämmtlich gleichschnell fallen, dies von dem Widerstande der atmosphärischen Luft herrührt, welcher sich ihrer Bewegung entgegensetzt. Es ist nun leicht, uns über die Art und Weise, in welcher dieser Widerstand auf die verschiedenen Körper wirkt, Rechenschaft zu geben.

Wenn ein Körper in der Luft fällt, so ist er der Wirkung zweier Kräfte ausgesetzt, von denen die eine sein Gewicht, die andere der Widerstand der Luft ist. Für Körper von gleichem Gewicht, aber verschiedener Grösse, ist die erste Kraft die nämliche; die zweite dagegen ist um so grösser, je grösser die Fläche des grössten Querschnitts ist, der durch jeden der Körper senkrecht auf die Richtung seiner Bewegung gemacht wird. Diese Körper werden folglich um so weniger schnell fallen, je grösser die Fläche ist, welche sie der Luft darbieten. Die Geschwindigkeit, mit welcher ein und derselbe Körper herabfällt, ist grösser oder kleiner, je nachdem er, nach der einen oder anderen Seite gekehrt, die Luft mit einer grösseren oder kleineren Fläche zu durchschneiden hat; desshalb fällt ein Blatt Papier viel langsamer in horizontaler als in vertikaler Lage.

Körper von derselben Natur und von ähnlicher Gestalt fallen nicht mit derselben Geschwindigkeit, wenn ihre Grösse verschieden ist. Wenn es sich z. B. um zwei Bleikugeln handelt, von denen

die eine einen doppelt so grossen Durchmesser als die andere hat, so ist das Gewicht der grösseren 8mal so gross als das der kleineren; ihre Massen stehen in dem nämlichen Verhältniss. Der Widerstand der Luft müsste also bei der ersteren Kugel ebenfalls 8mal so gross sein, als bei der zweiten, wenn ihre Bewegung die nämliche sein sollte. Dies ist aber nicht der Fall. Bei gleicher Geschwindigkeit ist der Widerstand, welchen die Luft der Bewegung der ersten Kugel entgegensetzt, nur 4mal so gross, als der, welchen die zweite erfährt, weil die Flächen ihrer grössten Querschnitte in dem Verhältniss 4 zu 1 zu einander stehen: die grössere Kugel wird also schneller fallen als die kleinere. Die nämlichen Betrachtungen zeigen, warum man mit Geschossen von demselben Material, aber von verschiedener Grösse, eine um so grössere Entfernung erreicht, je grösser sie sind; der Widerstand der Luft, welcher sich der Bewegung des Projektils engegensetzt, ist um so weniger fühlbar, je grösser die Masse desselben im Verhältniss zu seiner Oberfläche ist.

Wenn ein Körper in der Luft fällt, so beschleunigt sich seine Bewegung in Folge des Widerstandes, den er von Seiten der Luft erfährt, nicht in dem Grade, als wenn er im leeren Raum fiele. In dem Maasse als sich seine Geschwindigkeit vergrössert, vermehrt sich auch der Widerstand der Luft; seine Bewegung beschleunigt sich also immer weniger und weniger, da sich der Ueberschuss seines Gewichtes über den Widerstand mehr und mehr vermindert. Man sieht daraus sogar, dass die Geschwindigkeit des Körpers eine gewisse Grenze nicht überschreiten kann; diese Grenzgeschwindigkeit ist offenbar diejenige, bei welcher der Widerstand der Luft gleich dem Gewichte des Körpers ist. In der That, wenn der Körper einmal diese Geschwindigkeit besitzt, wird die Kraft, welche seine Bewegung zu beschleunigen sucht, von der Kraft, welche sich der Bewegung entgegensetzt, im Gleichgewicht gehalten und folglich die Bewegung von da ab eine gleichförmige. Die in Rede stehende Grenzgeschwindigkeit wird ausserdem um so kleiner sein, eine je grössere Fläche der Körper, bei derselben Masse, der Luft darbietet. Aus diesen Betrachtungen erklärt sich auch die Art und Weise, auf welche die Fallschirme, mittelst der man sich bekanntlich, ohne Schaden zu nehmen, von bedeutenden Höhen herabfallen lassen kann, wirken. Der Fallschirm ist ein Apparat, der genau die Gestalt eines grossen Regenschirms hat und welcher an seinem untersten Theil einen Korb trägt, in welchem sich derjenige, der sich herabfallen lassen

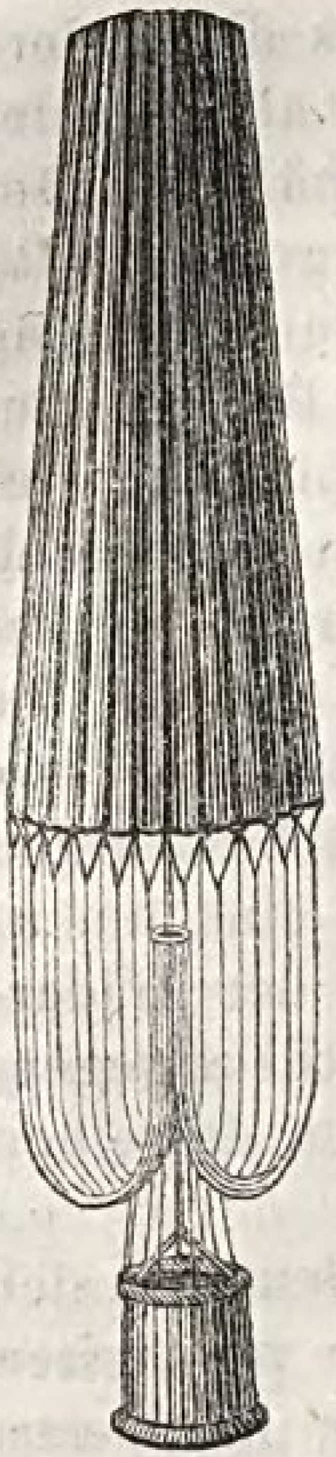


Fig. 506.

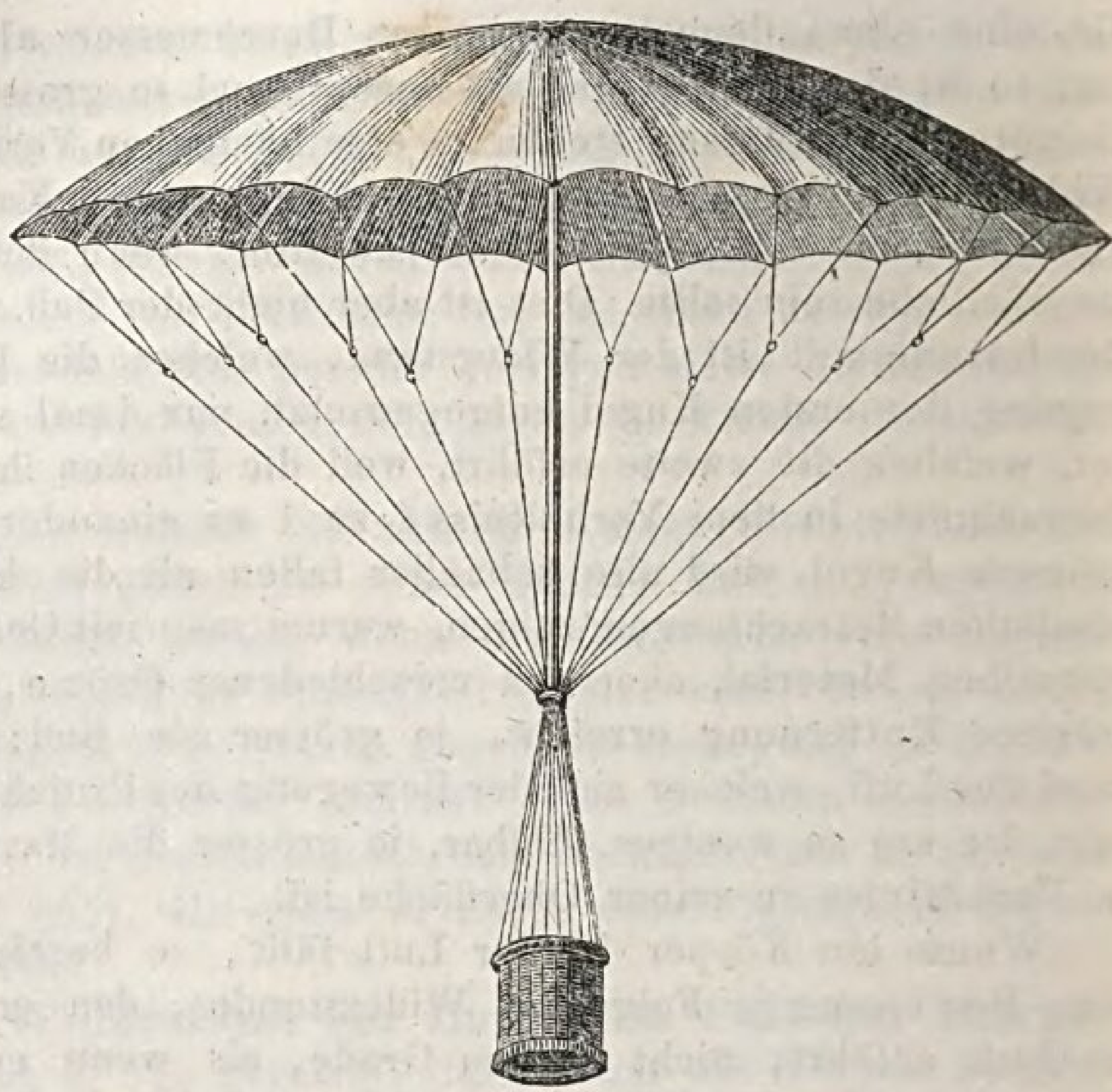


Fig. 507.

will, setzen kann. Wenn der Fallschirm geschlossen ist (Fig. 506), so kann er mit grosser Geschwindigkeit fallen; aber wenn er sich öffnet (Fig. 507), so bietet er der Luft eine so grosse Fläche dar, dass er, ungeachtet des Gewichts, welches er trägt, nur eine sehr mässige Geschwindigkeit annehmen kann. Wenn der Fallschirm, bevor er sich geöffnet hat, eine etwas grosse Geschwindigkeit angenommen hätte, so würde dieselbe nach seinem Oeffnen sofort vermindert werden, weil der Widerstand der Luft, da er nun grösser als das Gesammtgewicht des Apparats wäre, seine Bewegung verzögern würde.

§. 387. **Wirkung des Steuerruders bei der Bewegung eines Schiffes.** — Das Steuerruder, welches man an dem Hintertheil eines Schiffes anbringt, hat den Zweck, der Bewegung dieses Schiffes diejenige Richtung geben zu können, die sie haben soll. Es besteht aus nichts weiter als aus einer ebenen Fläche, die vertikal gestellt und um einen ihrer vertikalen Ränder wie in einem Scharnier beweglich ist. Um das Steuerruder um diese Art von Scharnier zu drehen, wirkt man entweder auf einen langen Hebel, welcher an seinem oberen Theile horizontal befestigt ist, oder auch wohl auf ein vertikales Rad, das, auf seinem ganzen Umfange mit Handgriffen versehen,

auf dem Verdeck des Schiffes steht und dessen Rotationsbewegung sich in irgend einer Weise dem Steuerruder mittheilt.

Nehmen wir an, dass das Wasser, auf welchem sich das Schiff bewegt, in Ruhe sei, dass ferner die Kraft, welche an diesem Schiffe angebracht ist, es im Sinne seiner Länge zu bewegen sucht und dass seine Bewegung während einer gewissen Zeit fortdauern soll, ohne die Richtung zu ändern. Es ist klar, dass man dann das Steuerruder so stellen muss, dass seine Flächen in der Richtung der Achse des Schiffes und folglich in der Richtung der Bewegung, welche dasselbe besitzt, liegen. Aber wenn man will, dass das Schiff von einem gegebenen Augenblick an eine andere Richtung einschlagen, dass sich sein Vordertheil z. B. von dem Punkte, nach welchem es bis jetzt gerichtet war, nach rechts abwenden soll, so wird man das Steuerruder nach derselben Seite hin drehen (Fig. 508). Da sich die Bewegung des Schiffes in der Weise, wie sie einen Augenblick vorher war, fortsetzt, so wird auf das Steuerruder von Seiten

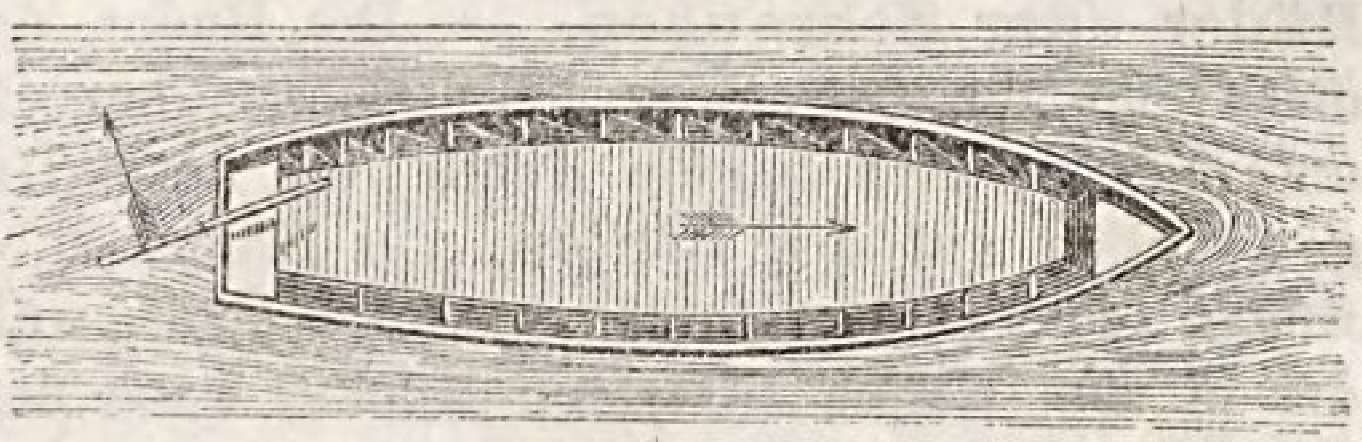


Fig. 508.

der Flüssigkeit in einer Richtung, senkrecht auf seine Fläche, ein Druck ausgeübt, den es vorher, ehe man ihm seine neue Stellung gegeben hatte, nicht erfuhr. Dieser Druck wirkt auf das Schiff, mit welchem das Steuerruder so zu sagen ein Stück ausmacht, und nöthigt es, sich in dem verlangten Sinne zu drehen. Wenn auf diese Weise die Achse des Schiffes in die neue Richtung, welche sie annehmen soll, gebracht ist, so stellt man das Steuerruder wieder so, wie es vorher war, und die Bewegung wird nun wieder in gerader Linie fortgesetzt, bis man von Neuem auf das Steuerruder wirkt.

Die Bewegung eines Schiffes findet häufig unter weniger einfachen Umständen statt als wir soeben vorausgesetzt haben. Die Kraft, mit welcher es fortbewegt wird, wirkt nicht immer im Sinne der Bewegung, welche man ihm geben will; dies ist z. B. meistens der Fall, wenn das Schiff durch den Wind getrieben wird. Ebenso besitzt die Flüssigkeit, in welcher die Bewegung stattfindet, oft selbst eine Geschwindigkeit, deren Richtung verschieden von derjenigen ist, die das Schiff erhalten soll; es folgt daraus, dass der Widerstand, welchen die Flüssigkeit der Bewegung des Schiffes entgegensetzt, nicht nach der

Achse desselben wirkt. Wenn das Schiff unter diesen Umständen kein Steuerruder hätte, so würde es sich in den meisten Fällen nicht in der Richtung bewegen, welche es nehmen soll. Mittelst des Steuerruders, indem man dasselbe nach der einen oder anderen Seite dreht, entwickelt man eine neue Kraft, die von dem Drucke herrührt, welchen das Steuerruder von Seite der Flüssigkeit erfährt; diese neue Kraft, indem sie sich mit denjenigen, von denen wir oben gesprochen haben, zusammensetzt, muss dem Schiffe die Bewegung geben, welche es erhalten soll.

Das Steuerruder eines Schiffes ist nichts als eine Nachahmung des Schwanzes der Fische, welcher denselben dazu dient, sich nach Belieben nach der einen oder anderen Seite zu wenden, indem sie ihn etwas nach rechts oder links von seiner natürlichen Stellung ablenken.

§. 388. **Fortbewegung der Schiffe mittelst Ruder, Räder oder Schrauben.** — Die Ruder, deren man sich bedient, um die Bewegung eines Kahnes hervorzubringen und zu unterhalten, sind gerade Hebel, die ihren Unterstützungspunkt gewöhnlich auf den Rändern des Kahns haben. Das eine der Enden jedes Ruders taucht in das Wasser, während ein Mensch, der in dem Kahne sitzt, den Rücken nach dem Vordertheil des Schiffes gekehrt, das andere Ende gegen sich herzieht. In dieser Weise auf das Ruder wirkend, dreht er dasselbe um seinen Unterstützungspunkt und bewegt folglich das Ende, welches in's Wasser taucht, in der Richtung vom Vordertheil nach dem Hintertheil des Schiffes. Diese Bewegung des Ruders entwickelt einen Widerstand von Seiten der Flüssigkeit und dieser Widerstand ist einer Kraft gleich zu achten, welche an dem Ruder wirkt und im entgegengesetzten Sinne der Bewegung desselben gerichtet ist, d. h. vom Hinter- nach dem Vordertheil des Kahns. Das Ruder ist also der Wirkung zweier paralleler und in dem nämlichen Sinn wirkender Kräfte ausgesetzt; eine derselben entspringt aus der Wirkung des Menschen, welcher das Ruder handhabt, und die andere ist der Widerstand, welchen die Flüssigkeit der Bewegung des Ruders im Wasser entgegensetzt. Diese beiden Kräfte, indem sie an den beiden Enden des Ruders wirken, geben eine Resultante, gleich ihrer Summe, welche in dem Punkte angreift, wo sich das Ruder gegen den Rand des Kahns stützt; und es scheint, als ob diese Resultante die Kraft wäre, welche auf den Kahn wirkt, um ihn in Bewegung zu erhalten. Aber bei einiger Ueberlegung sieht man leicht, dass der Mensch mit seinen Händen keine Zugkraft an dem Ende des Ruders ausüben

kann, ohne dass er sich zu gleicher Zeit mit seinen Füssen gegen den Kahn stützt und auf diese Weise einen Druck gegen denselben ausübt, der gleich und entgegengesetzt jener Zugkraft ist; in Folge der Kraft, welche durch die Zusammenziehung seiner Muskeln entwickelt wird, wirkt sein Körper wie eine Feder, die zusammengedrückt wurde, und welche, indem sie sich wieder abzuspannen sucht, gleiche und entgegengesetzte Drückungen auf die Körper ausübt, mit denen ihre Enden in Berührung sind. So ruft also die Wirkung des Menschen auf das Ruder in den Punkten, wo sich dieses gegen den Kahn stützt, einen Druck, gleich der Resultante, von der wir so eben gesprochen haben, hervor; aber es findet zu gleicher Zeit ein Druck im entgegengesetzten Sinne statt, den er durch seine Füsse ausübt. Im Ganzen ist also der Kahn nur der Differenz dieser beiden Kräfte ausgesetzt und diese Differenz ist offenbar genau gleich dem Drucke, welchen das Ruder von Seite der Flüssigkeit erfährt, in welcher es sich bewegt; diese Kraft allein ist es, welche die Bewegung des Kahns zu beschleunigen sucht.

Das Resultat, zu welchem wir eben gelangt sind, erhält man unmittelbar, wenn man sich weiter nichts darum bekümmert, wie das Ruder mit dem Kahne in Verbindung steht, und auf welche Weise es bewegt wird. Der Widerstand, welchen das Wasser ihm entgegensetzt, ist offenbar die einzige äussere Kraft, welche auf den Kahn wirkt, und kann folglich als die bewegende Kraft betrachtet werden, welche die Geschwindigkeit desselben zu vermehren sucht.

Wenn das Ruder um eine gewisse Grösse um seinen Unterstützungspunkt gedreht worden ist, so gelangt es in eine Lage, in welcher die Fortsetzung der gleichen Wirkung auf dasselbe nicht mehr möglich ist. Dann senkt der, welcher es handhabt, das Ende, welches er in seinen Händen hält, um zu gleicher Zeit das andere Ende aus dem Wasser zu erheben; hierauf dreht er das Ruder im entgegengesetzten Sinne wie vorher, und erst, wenn er es in passende Lage gebracht hat, senkt er es wieder in's Wasser, um von Neuem seine Zugkraft ausüben zu können. — Indem man auf diese Weise dem Ruder eine Reihe von hin- und hergehenden Bewegungen in der Weise ertheilt, wie wir sie soeben beschrieben haben, kann die Bewegung des Kahns eine beliebige Zeit hindurch unterhalten werden. Bei diesen hin- und hergehenden Bewegungen geht das Ende des Ruders, welches sich ausserhalb des Kahns befindet, bald vom Vorder- nach dem Hintertheil, bald in entgegengesetzter Richtung. In dem ersten

Fall taucht es in's Wasser, im zweiten ist es aus dem Wasser gehoben und bewegt sich in der Luft.

Der Druck, welchen das Ruder von Seite der Flüssigkeit erfährt, ist um so grösser, je schneller es bewegt wird und je grösser die Fläche ist, mit welcher es der Flüssigkeit begegnet. Um behufs Erreichung einer gewissen Wirkung auf den Kahn die Geschwindigkeit des Ruders nicht zu sehr vergrössern zu müssen, macht man lieber den Theil desselben, der in das Wasser eintaucht, breiter und lässt ihm nur gerade die Dicke, welche zu seiner ausreichenden Festigkeit nothwendig ist. Man erzielt durch diese Vergrösserung der Fläche denselben Erfolg wie durch eine Vergrösserung der Geschwindigkeit, aber die Handhabung des Ruders ist dadurch leichter geworden.

Um einen Kahn mittelst Ruder in passender Weise fortbewegen zu können, müssen dieselben in gerader Anzahl vorhanden sein, und die Hälfte von ihnen auf der einen, die andere Hälfte auf der anderen Seite wirken. Denn wenn dies nicht der Fall wäre, so müssten offenbar die Drückungen, welche durch Vermittlung der Ruder von Seite der Flüssigkeit auf den Kahn ausgeübt werden, eine Resultante geben, welche nicht in der Achse des Kahnes wirkt und in Folge ihrer schiefen Richtung den Kahn fortwährend von der Richtung abzulenken sucht, die er in irgend einem Augenblick verfolgt.

§. 389. Um ein Schiff von grösseren Dimensionen mittelst Ruder fortzubewegen, müsste man, wie es bei den Galeeren der früheren Zeit wirklich geschah, eine grosse Anzahl derselben anwenden, was jedoch Nachtheile und Unbequemlichkeiten verschiedener Art, besonders für etwas längere Reisen, nach sich ziehen würde. In diesem Fall ersetzt man die Ruder durch sog. Schaufelräder (Fig. 509), welche mittelst einer Dampfmaschine um ihre Achse gedreht werden. Darin besteht die wesentliche

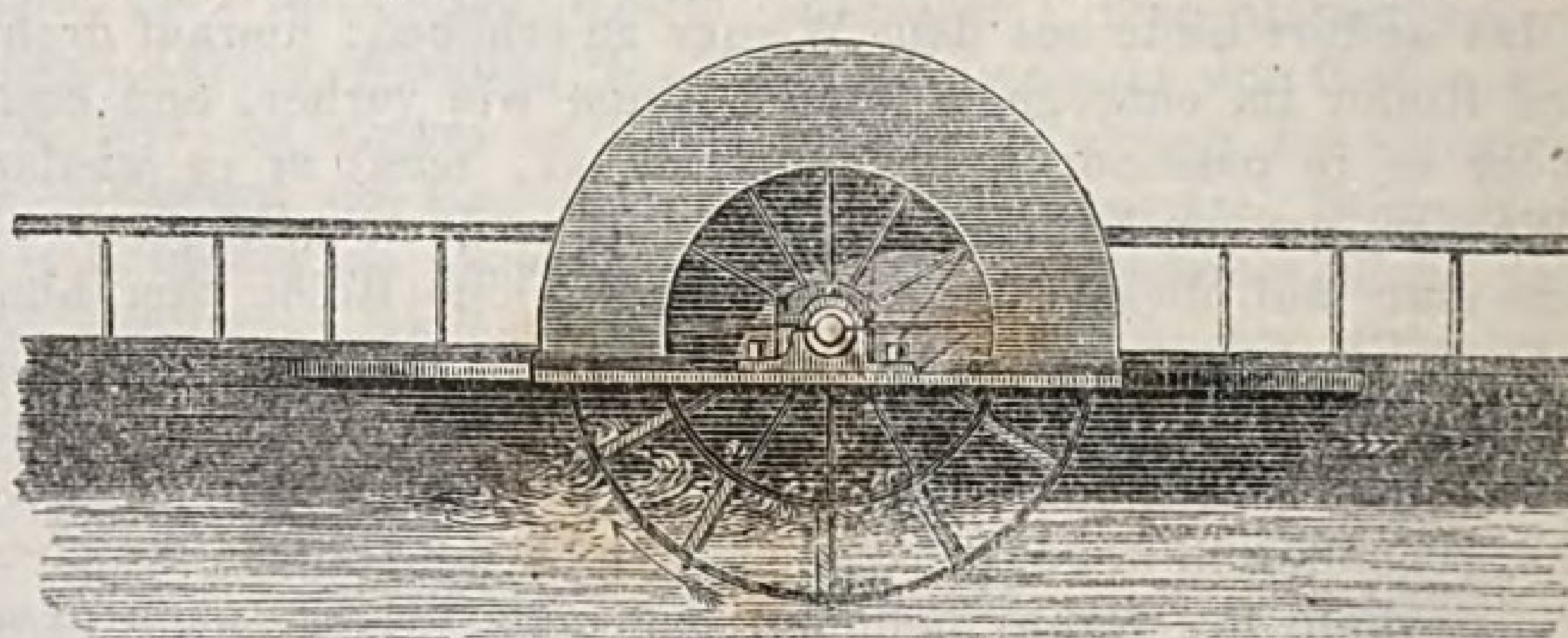


Fig. 509.

Einrichtung der Dampfschiffe. Es sind immer zwei Räder, eines an jeder Seite des Schiffes, vorhanden; sie sind an den beiden Enden einer horizontalen Welle befestigt, die senkrecht zur Länge des Schiffes durch dasselbe hindurchgeht und von einer Dampfmaschine in Rotation versetzt wird. Die Schaufeln dieser Räder wirken ganz auf dieselbe Weise wie die Ruder. Wenn sie sich in dem unteren Theile des Kreises, welchen sie beschreiben, befinden, so tauchen sie in das Wasser und bewegen sich in der Richtung vom Vorder- nach dem Hintertheil des Schiffes; hierauf heben sie sich aus dem Wasser und bewegen sich in der Luft im entgegengesetzten Sinne, um wieder in das Wasser zu tauchen und sich darin in derselben Weise wie vorhin zu bewegen. Der Druck, welchen dabei das Wasser auf die in Bewegung befindlichen eingetauchten Schaufeln ausübt, ist die bewegende Kraft, welche, indem sie auf das Schiff wirkt, die Geschwindigkeit desselben zu vergrössern sucht.

§. 390. In neuester Zeit werden häufig die Räder der Dampfschiffe durch die Schraube ersetzt. Um uns über die Wirkungsweise dieser Schrauben, denen man sehr verschiedene Formen gegeben hat, Rechenschaft zu geben, denken wir uns, dass ein Schiff mit einer gewöhnlichen Schraubenspindel, deren Achse horizontal und im Sinne der Länge des Schiffes gerichtet ist, versehen sei; wir denken uns ferner, dass diese Spindel, indem sie sich in Lagern, die an dem Schiffe befestigt sind, drehen kann, in eine Mutter eingreife, die im Verhältniss zu ihrer Umgebung in unveränderlicher Stellung festgehalten ist. Wenn man die Spindel dreht, so bewegt sie sich in der Mutter vorwärts und zieht das Schiff mit sich fort. Die Schraube, welche man an einem Schiff anbringt, ist in Wirklichkeit nichts anderes als eine Schraubenspindel, welche in ähnlicher Weise, wie wir sie eben beschrieben haben, wirkt; der Unterschied besteht blos darin, dass die feste Mutter durch das Wasser ersetzt ist, in welchem sich die Schraube dreht. Dieses Wasser bleibt zwar nicht unbeweglich, wie wir es von der Mutter, an deren Stelle es sich befindet, vorausgesetzt haben, aber der Widerstand, welchen es gegen die geneigten Flächen der Schraube ausübt, ertheilt dem Schiffe nichtsdestoweniger eine fortschreitende Bewegung, deren Geschwindigkeit um so grösser ist, je schneller die Schraube gedreht wird.

Die Schraube A (Fig. 510) wird hinten an dem Schiffe, an dem unteren Theil desselben und in der Vertikalebene angebracht, welche durch die Achse des Schiffes geht; sie befindet sich auf diese Weise in kleiner Entfernung von dem Steuerruder B.

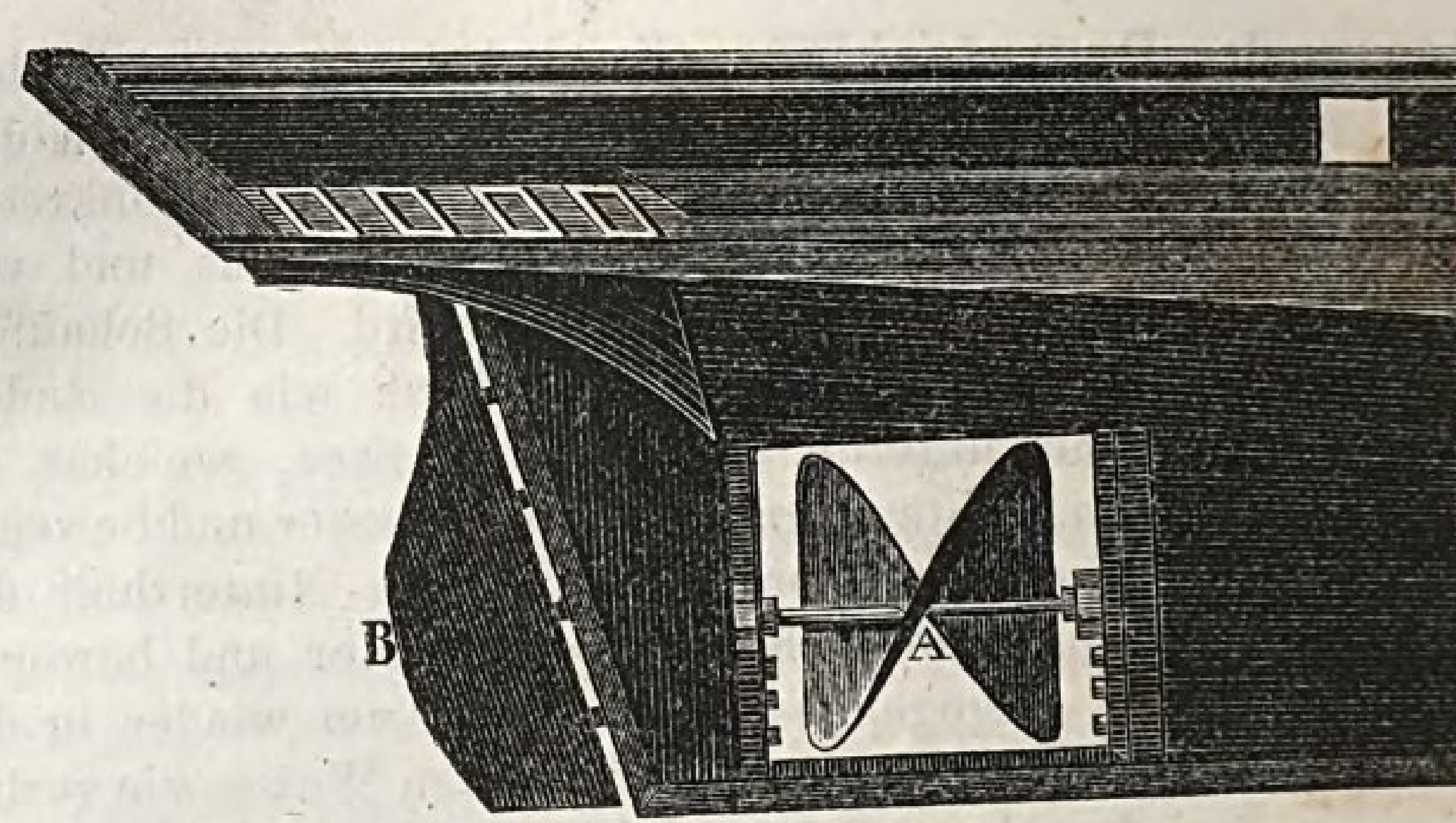


Fig. 510.

Wenn man der Art und Weise, in welcher die Schraube angebracht ist, einige Aufmerksamkeit schenkt, so sieht man alsbald, dass sie für die Schifffahrt auf dem Meere namentlich einen Vortheil darbietet: dieser besteht darin, dass ihre Wirkung stets eine regelmässige ist, was bei den Schaufelrädern nicht der Fall ist. Das Schiff neigt sich, bald auf die eine, bald auf die andere Seite; die beiden Räder sind daher fast fortwährend ungleich tief eingetaucht, und die Drückungen, welche sie von Seite des Wassers erfahren, sind in Folge dessen manchmal sehr verschieden von einander: das Schiff wird also beständig, bald nach der einen, bald nach der anderen Seite, von seiner Richtung abzulenken gesucht. Die Schraube im Gegentheil wirkt immer auf dieselbe Art, welche Neigung auch das Schiff in dem einen oder anderen Sinne hat; sie überträgt auf das Schiff beständig einen Druck, der im Sinne der Achse desselben gerichtet ist.

Die Erfahrung hat in der That gezeigt, dass die Schraube als Mittel zur Fortbewegung der Schiffe auf dem Meere den Schaufelrädern allemal dann vorzuziehen ist, wenn die Fahrt nicht unter so regelmässigen Umständen vor sich gehen kann wie in dem Falle, wo Windstille herrscht; aber selbst bei völliger Windstille ist die Wirkung der Schraube noch ebenso vortheilhaft wie die der Schaufelräder.

Man hat den Schrauben nach und nach sehr verschiedene Formen gegeben, ist aber bis heute noch nicht dazu gelangt, diejenige sicher festzustellen, welche die meisten Vortheile bietet. An dem ersten englischen Schraubenschiff,*) dem „Archimedes", erbaut 1840 von *Smith*, bestand die Schraube aus einer einzigen

*) Der Erfinder der Schiffsschraube ist ein Deutscher, *Joh. Ressel* (1812).

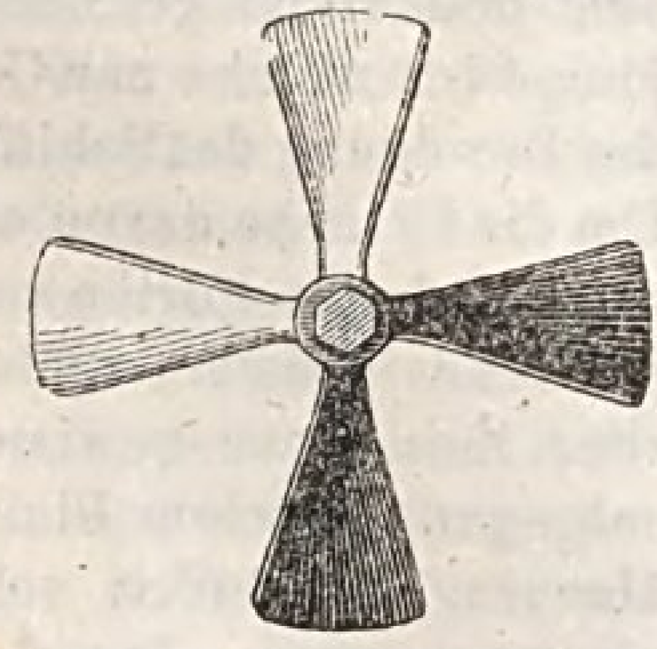


Fig. 511.

Windung von 360 Grad; später construirte man aber mit Vortheil Schrauben mit zwei Windungen, jede von 180 Grad, wie z. B. A (Fig. 510). Die Figur 511 zeigt die Schraube des französischen Schiffes „Napoleon"; man sieht, dass sie von vier schiefstehenden Flügeln gebildet ist, welche etwa wie die Flügel einer Windmühle angeordnet sind. Die Figur 512 zeigt, wie diese Schraube am Hintertheil des Schiffes, ganz nahe dem Steuerruder, angebracht ist.

§. 391. Ob man sich der Ruder, der Räder oder der Schrauben bedient, um ein Schiff fortzubewegen, immer ist man genöthigt,

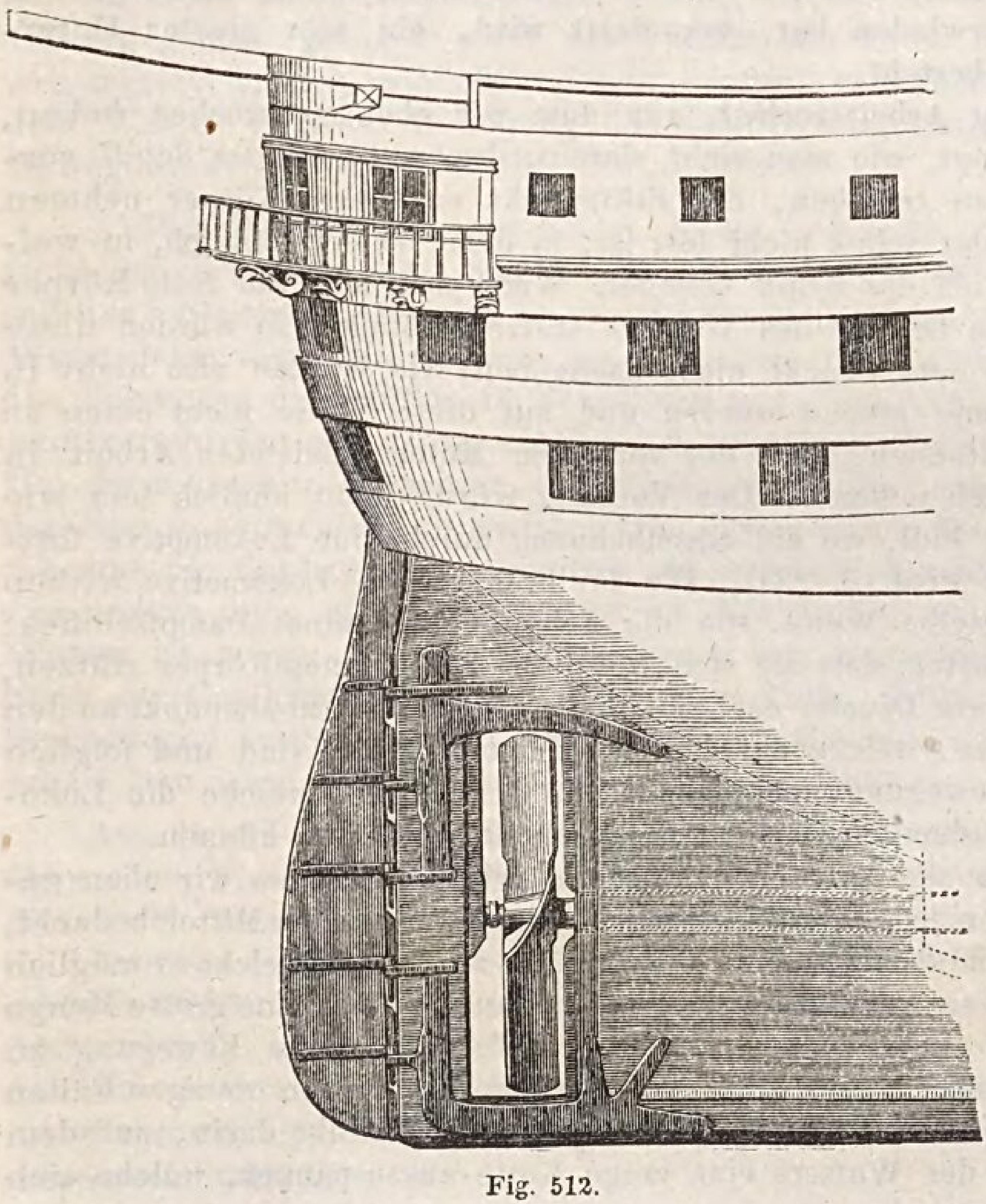


Fig. 512.

eine bedeutend grössere Menge an Arbeit zu entwickeln als diejenige ist, welche zur Ueberwindung der Widerstände, welche sich der Bewegung des Schiffes entgegensetzen, gerade erforderlich wäre. Um die Ursache davon einzusehen, darf man nur bedenken, dass diese verschiedenen Fortbewegungsapparate den bewegenden Druck von Seite des Wassers nicht erfahren können, ohne dass sie zu gleicher Zeit einer gewissen Menge Wasser eine Geschwindigkeit in entgegengesetztem Sinne von derjenigen, welche auf das Schiff übertragen werden soll, ertheilen. Der ganze Theil der Bewegungsarbeit, der dazu verwendet wird, diese Bewegung des Wassers hervorzubringen, ist reiner Verlust; und davon rührt es her, dass zwischen der Bewegungsarbeit, welche von dem Motor, der die Fortbewegungsapparate in Bewegung setzt, und der Widerstandsarbeit, welche durch die Widerstände, die das Schiff zu überwinden hat, veranlasst wird, ein sehr grosser Unterschied besteht.

Der Arbeitsverlust, von dem wir eben gesprochen haben, entspringt, wie man sieht, daraus, dass man, um das Schiff vorwärts zu schieben, den Stützpunkt an einem Körper nehmen muss, der selbst nicht fest ist, in dem Wasser nämlich, in welchem sich das Schiff befindet. Wenn man sich auf feste Körper auf dem Grunde des Wassers stützen könnte, so würden diese Körper dem Drucke nicht nachgeben; sie würden also nicht in Bewegung gesetzt werden und auf diese Weise nicht einen so beträchtlichen Theil der von dem Motor geleisteten Arbeit in Anspruch nehmen. Der Vorgang würde dann ähnlich sein wie in dem Fall, wo ein Eisenbahnzug durch eine Lokomotive fortbewegt wird (§. 234). Die Treibräder einer Lokomotive wirken auf dieselbe Weise wie die Schaufelräder eines Dampfschiffes; aber anstatt dass sie sich wie diese gegen einen Körper stützen, der ihrem Drucke nachgibt, haben sie ihren Anhaltspunkt an den Schienen, welche auf dem Erdboden befestigt sind und folglich eine Bewegung, entgegengesetzt derjenigen, welche die Lokomotive dem Zug ertheilen soll, nicht annehmen können.

Um den grossen Verlust an Arbeit, von dem wir oben gesprochen haben, zu vermindern, war man auf ein Mittel bedacht, den Dampfschiffen eine feste Stütze zu geben, welche es möglich macht, sie vorwärts zu bewegen, ohne zugleich eine grosse Menge Wasser in eine ihrer eigenen entgegengesetzte Bewegung zu versetzen. Dieses Mittel, welches freilich nur in wenigen Fällen mit Vortheil angewendet werden kann, besteht darin, auf dem Grund des Wassers eine lange Kette auszuspannen, welche sich

nach der ganzen Länge des Wegs, den das Schiff zurücklegen soll, erstreckt und an ihren beiden Enden mit dem Erdboden in feste Verbindung gesetzt ist. Diese Kette geht durch das Schiff seiner ganzen Länge nach hindurch, wickelt sich aber dabei um eine Art Rolle herum, sodass sie nicht über den Umfang derselben weggleiten kann. Die Dampfmaschine, welche sich auf dem Schiffe befindet, wird einzig dazu angewandt, diese Rolle zu drehen, und dadurch muss sich offenbar das Schiff längs der Kette fortbewegen. Dampfschiffe dieser Art werden in Paris auf der Seine als Schleppschiffe für andere Schiffe gebraucht. In neuester Zeit wurden Versuche der Art auch auf dem Rhein angestellt.

Es ist wohl kaum nöthig, hinzuzufügen, dass in dem Fall, wo ein Schiff durch Menschen oder Pferde, welche an dem Ufer entlang gehen, gezogen wird, der Verlust des Theils der Bewegungsarbeit, der, wie oben gesagt, darauf verwendet wird, dem Wasser eine der Bewegung des Schiffes entgegengesetzte Bewegung zu geben, gleichfalls nicht stattfindet.

§. 392. Die Wirkung der Ruder, Räder und Schrauben besteht lediglich darin, dem Schiffe, an welchem sie wirken, eine relative Bewegung gegen das es umgebende Wasser zu ertheilen. Wenn daher diese Wassermasse selbst in Bewegung ist, so kann die Bewegung des Schiffes, im Verhältniss zum Wasser aufgefasst, sehr verschieden von seiner absoluten Bewegung im Raume sein. Um diese absolute Bewegung des Schiffes zu finden, muss man dasselbe so betrachten, als wenn es zwei Bewegungen, von denen die eine die Bewegung des Wassers, auf welchem es schwimmt, die andere seine eigene Bewegung im Verhältniss zu diesem Wasser ist, zu gleicher Zeit besässe; indem man in jedem Augenblick die Geschwindigkeiten, welche es in Folge dieser beiden Bewegungen besitzt, in eine Resultante zusammenfasst (§. 17), erhält man seine absolute Geschwindigkeit im Raum.

Aus diesem Grunde muss ein Kahn, mit welchem man quer über einen Fluss in einer Richtung, die senkrecht auf der des fliessenden Wassers ist, setzen will, so gerichtet und die Ruder in demselben so gebraucht werden, als wenn man den Fluss in schiefer Richtung hinauf fahren wollte. Wenn man ebenso überfahren würde, als wenn das Wasser in Ruhe wäre, so würde man das andere Ufer in einem Punkt erreichen, der, anstatt dem Ausgangspunkt gerade gegenüber zu liegen, weit unterhalb desselben sein würde.

Wenn die Bewegung des Schiffes dieselbe Richtung wie diejenige des Wassers, in dem es sich bewegt, hat, so ist seine absolute Geschwindigkeit gleich der Summe oder der Differenz der Geschwindigkeit des Wassers und seiner Geschwindigkeit im Verhältniss zu diesem letzteren, je nachdem es sich im Sinn der Bewegung des fliessenden Wassers oder in entgegengesetztem Sinne fortbewegt. Nehmen wir z. B. an, dass ein Dampfschiff, welches wenn es sich in ruhig stehendem Wasser fortbewegt, eine Geschwindigkeit von 5^m in der Secunde annimmt, auf einem Flusse, dessen Geschwindigkeit 2^m in der Secunde beträgt, fährt, so ist klar dass seine absolute Geschwindigkeit 7^m oder 3^m in der Secunde betragen wird, je nachdem die Fahrt stromab- oder stromaufwärts geht.

Aus dem Vorhergehenden folgt, dass sich ein Dampfschiff nur dann in einem fliessenden Wasser stromaufwärts bewegen kann, wenn die Geschwindigkeit, welche es in ruhigem Wasser annimmt, grösser als die Geschwindigkeit des Flusses ist. Denn wenn dies nicht der Fall ist, so wird das Schiff, indem es stromaufwärts zu fahren sucht, durch das Wasser mit abwärts gerissen, und erhält in dieser, der beabsichtigten entgegengesetzten Richtung eine Geschwindigkeit gleich dem Ueberschuss der Geschwindigkeit des Wassers über diejenige, welche es im Vergleich mit dem Wasser hat.

§. 393. **Luftschifffahrt.** — Seitdem man in dem Luftballon ein Mittel gefunden hat, sich in die atmosphärische Luft zu erheben, hat man sich auch mit dem Gedanken beschäftigt, diese Erfindung zur Ausführung von Reisen zu benützen. Aber um diese Idee zu verwirklichen, muss man es dahin bringen, dem Ballon nach Belieben diese oder jene Richtung zu geben, man muss ihn mit einem Worte lenken oder steuern können. Es wurden schon viele und grosse Anstrengungen gemacht, um die Lösung dieser Aufgabe zu finden, aber bis heute sind die Resultate, welche erzielt worden sind, noch fast Null; man fragt sich sogar, ob es denn überhaupt möglich sei, dass diese Bemühungen einen Erfolg haben können. Indem wir auf diese berühmte Frage der Steuerung des Luftballons etwas tiefer eingehen, wird es uns nicht schwer werden, uns über das, worauf es dabei eigentlich ankommt, genaue Rechenschaft zu geben und zu sehen, inwiefern man darauf rechnen kann, eine vollständige Lösung der Frage zu finden.

Denken wir uns, dass sich ein Ballon in einer Schichte der Atmosphäre im Gleichgewicht befinde, und dass die Luft in dieser

Schichte vollkommen in Ruhe sei. Ist es möglich mittelst eines Apparats, der in passender Weise an dem Ballon angebracht ist, eine fortschreitende Bewegung desselben in irgend einer beliebigen Richtung hervorzubringen? Es ist nicht schwer, diese Frage zu beantworten. Zunächst ist wohl klar, dass man, sobald es möglich ist, eine Bewegung in einem gewissen Sinne hervorzubringen, dieselbe Bewegung auch in jeder anderen Richtung erzeugen kann, weil die Luft, in welcher sich der Ballon befindet, als unbewegt vorausgesetzt worden ist; überdies darf man auch nur ein Steuerruder, ähnlich dem an einem Schiffe anwenden, um nach Belieben die Richtung einer einmal hervorgebrachten Bewegung ändern zu können. Es bleibt also nur übrig, zuzusehen, ob es möglich ist, dem Ballon eine fortschreitende Bewegung in der als unbewegt vorausgesetzten Luft geben zu können. Daran ist aber nicht zu zweifeln, wenn man bedenkt, dass man zu diesem Behufe an dem Ballon nur solche Vorrichtungen, welche den Flügeln der Vögel gleichen und sich wie diese bewegen können, anbringen darf. Apparate dieser Art, welche eine hin- und hergehende Bewegung besitzen und der Luft, wenn sie sich in dem einen Sinne bewegen, eine grössere Fläche darbieten, während sie dieselbe bei ihrer Bewegung im entgegengesetzten Sinne mit der schmalen Kante durchschneiden, sind sicher im Stande, dem Ballon eine fortschreitende Bewegung mitzutheilen. Anstatt dieser Art Ruder mit grosser Fläche könnte man sich auch der Schrauben, ähnlich denjenigen an den Schiffen (§. 390), bedienen. Aber wenn man die Grösse bedenkt, welche ein Ballon nothwendig haben muss, um einige Personen tragen zu können, und wenn man darnach die Grösse der Fläche bemisst, mit welcher er der atmosphärischen Luft in dieser Bewegung begegnet, so begreift man, dass ein solcher Fortbewegungsapparat, welcher Art er auch sei, indem er durch die Reisenden in Bewegung gesetzt wird, dem Luftballon jedenfalls nur eine geringe Geschwindigkeit zu geben im Stande sein wird. Man kann allerdings auf den Gedanken kommen, auf dem Luftballon eine Bewegungsmaschine, eine Dampfmaschine z. B., anzubringen. Aber indem man dadurch auf der einen Seite die Kraft, über die zur Bewegung der Fortbewegungsapparate verfügt werden kann, vergrössert, vermehrt man auf der anderen Seite die Belastung des Ballons; die Folge davon ist, dass auch das Volumen des letzteren zunehmen muss, und dadurch wird wiederum eine Vergrösserung des Widerstandes, der zu überwinden ist, um den Ballon in bestimmter Geschwindigkeit zu erhalten, hervorgebracht.

Es ist somit sehr wahrscheinlich, dass, welches auch die getroffene Einrichtung sei, die Geschwindigkeit, welche man dem Ballon in ruhiger Luft geben könnte, doch immer nur klein sein würde. Doch nehmen wir an, dass man hoffen dürfe, durch Anwendung einer anderen Kraft als derjenigen der Reisenden selbst eine schnellere Bewegung hervorbringen zu können, so müsste doch der ganze Ballon viel grössere Dimensionen erhalten als die, welche man bis jetzt angewandt hat; der Fortbewegungsapparat selbst müsste eine sehr bedeutende Grösse erhalten und dabei so leicht als möglich sein; dadurch wird er aber einerseits nicht nur sehr schwierig zu handhaben, sondern er ist auch häufigen Beschädigungen ausgesetzt, in Folge deren er oft ausser Stande sein würde, seine Dienste zu thun.

Sehen wir jetzt, was stattfinden würde, wenn man den Ballon inmitten einer Luftschichte fortbewegen wollte, die selbst in Bewegung begriffen ist. Der Ballon würde offenbar eine absolute Geschwindigkeit, gleich der Resultante aus der Geschwindigkeit der Luft und seiner eigenen im Verhältniss zu dieser Schichte annehmen (§. 392). Damit sich folglich der Ballon in der gewünschten Richtung bewegen könnte, dürfte seine Geschwindigkeit in Bezug auf die umgebende Luft im Verhältniss zur Geschwindigkeit dieser Luft nicht zu klein sein. Wenn man z. B. dem Ballon eine Bewegung ertheilen wollte, die derjenigen des Luftstromes, in welchem er sich befindet, gerade entgegengesetzt wäre, so müsste seine Geschwindigkeit in Bezug auf die ihn umgebende Luft grösser als die Geschwindigkeit dieses Luftstroms sein. Man sieht daraus, dass der Ballon, sobald er sich nicht mehr in ganz ruhiger oder doch in einer Luft befindet, die nur eine sehr geringe Geschwindigkeit besitzt, nicht mehr beliebig in jeder Richtung fortbewegt werden kann. Nun weiss man aus den Erfahrungen, welche die Luftschiffer gemacht haben, dass die Luftschichten, in welchen sie ihre Reisen ausführten, keineswegs so geringe Geschwindigkeit besassen. Gewöhnlich wurde der Luftballon in weniger als einer Stunde um eine grosse Zahl von Kilometern von seinem Ausgangspunkt fortgeführt. Die Aufgabe der willkürlichen Steuerung des Luftballons ist folglich einer praktischen Lösung nur unter Umständen fähig, die nur ausnahmsweise in der atmosphärischen Luft stattfinden. In den meisten Fällen kann der Ballon, der mit einem Fortbewegungsapparat versehen ist, nicht mit Erfolg gegen die Bewegung der Luft, in welcher er sich befindet, ankämpfen. Fügen wir hinzu, dass man nicht hoffen darf, den Gedanken einer wirklichen Luftschifffahrt selbst unter der Be-

dingung zu verwirklichen, dass man für die Zeit der Abreise abwarten wollte, bis sich die Atmosphäre in günstigen Umständen befände; denn auf der einen Seite würde man dabei oft genöthigt sein, sehr lange warten zu müssen, und andererseits würde es nur sehr selten der Fall sein, dass die Atmosphäre während der ganzen Dauer der Reise die für dieselbe günstige Beschaffenheit behielte.

Wir können zwischen der gewöhnlichen Schifffahrt und der Luftschifffahrt eine Parallele ziehen. Die Kähne wie die Schiffe, welche durch Ruder, Räder oder Schrauben bewegt werden, können in ruhigem Wasser jede beliebige Richtung erhalten; sie können auch in einem fliessenden Wasser nach Belieben gesteuert werden, unter der Bedingung jedoch, dass die Geschwindigkeit dieses Wassers nicht zu gross ist. Dasselbe ist bei einem Luftballon der Fall, der mit einem Fortbewegungsapparat versehen ist; er kann nach jeder Richtung hin bewegt werden, so lange die ihn umgebende Luft entweder ganz unbeweglich, oder doch nur von einer Geschwindigkeit ergriffen ist, die eine gewisse Grenze nicht übersteigt. Aber die meisten fliessenden Wasser haben eine Geschwindigkeit, die klein genug ist, dass ein Schiff noch stromaufwärts fahren kann; die Strömungen der atmosphärischen Luft dagegen sind gewöhnlich viel zu schnell, als dass man hoffen dürfte, mit einem Ballon, der mit einem Fortbewegungsapparat versehen ist, dagegen ankämpfen zu können. Unter den Verhältnissen, wie sie gewöhnlich in der atmosphärischen Luft stattfinden, ist die Fahrt eines Luftballons, der nach Belieben gelenkt werden soll, mit der Fahrt eines Dampfschiffes auf einem reissenden Bergstrom zu vergleichen.

III. Maschinen zum Heben der Flüssigkeiten.

§. 394. Das Heben von Flüssigkeiten und hauptsächlich des Wassers auf eine gewisse Höhe nimmt unter den verschiedenen Arbeiten, welche mittelst Maschinen ausgeführt werden, eine hervorragende Stelle ein. Bald hat man das Wasser aus grösseren oder geringeren Tiefen unter der Oberfläche der Erde heraufzuschaffen, um in die Räume, welche es ausfüllt, gelangen und darin arbeiten zu können, sei es behufs der Fundation von Bauten, sei es zum Zwecke der Ausbringung von Erzen; bald will man einen Theil des Wassers eines Flusses nur auf eine geringere

Höhe heraufheben, um es zur Bewässerung der umliegenden Grundstücke zu benützen; ein andermal wieder will man Wasser oder verschiedene andere Flüssigkeiten, sei es zum häuslichen Gebrauch, sei es zur Verwendung in industriellen Etablissements, in die Höhe fördern. Um diesen verschiedenen Zwecken zu dienen, hat man eine grosse Anzahl von Maschinen erdacht, von denen wir nun die wichtigsten kennen lernen wollen.

Die Arbeit, welche nothwendig ist, um eine gewisse Menge Flüssigkeit auf eine bestimmte Höhe zu heben, wird erhalten, indem man das Gewicht der zu hebenden Flüssigkeit, ausgedrückt in Kilogrammen, mit der Höhe, auf welche sie gehoben werden muss, diese Höhe in Metern gemessen, multiplicirt. Die so erhaltene Zahl gibt die Bewegungsarbeit, welche man an der Maschine, welcher Art sie auch sei, aufwenden muss, damit sie die Nutzarbeit, welche der Erhebung der Flüssigkeitsmasse auf die gewünschte Höhe entspricht, liefern kann, vorausgesetzt, dass keinerlei Verluste an Arbeit mit der Anwendung dieser Maschine verbunden wären. In Wirklichkeit aber ist die Bewegungsarbeit, welche an einer Maschine, die zum Heben einer Flüssigkeit bestimmt ist, aufgeboten werden muss, immer grösser als die Nutzarbeit, welche diese Maschine leisten kann, weil es unmöglich ist die Verluste an Arbeit vollständig zu vermeiden. Diese Verluste rühren her: 1) von der Reibung der festen Theile der Maschine aneinander; 2) von den Stössen, welche zwischen diesen festen Theilen stattfinden können; 3) von der Reibung der Flüssigkeit an den Wänden, zwischen welchen sie sich bewegt; 4) von plötzlichen Aenderungen, welche in der Grösse oder Richtung der Geschwindigkeit der Flüssigkeit vorkommen können; 5) endlich von der Geschwindigkeit, welche die Flüssigkeit noch besitzt, wenn sie in der Höhe, auf welche sie gehoben werden sollte, angekommen ist, und welche der Flüssigkeit nur mit Aufwand eines Theils der Bewegungsarbeit der Maschine gegeben werden kann. Wenn es sich also um die Anlegung einer Maschine zum Heben einer Flüssigkeit handelt, so muss man diese verschiedenen Ursachen von Arbeitsverlusten wohl im Auge haben, um ihre Wirkung mittelst zweckdienlicher Einrichtungen so viel als möglich zu vermindern.

Sollen a Cubikmeter Wasser h Meter hoch gefördert werden, so ist dazu eine Nutzbarkeit von 1000 ah Kilogramm-Meter erforderlich; und wenn jene Wassermenge in je t Secunden verlangt wird, so gehören dazu

$$\frac{1000\,a\,h}{75\,t} = 13{,}33\,\frac{a\,h}{t} \text{ Pferdekräfte.}$$

Die verschiedenen Maschinen, welche zum Heben der Flüssigkeiten dienen, unterscheiden sich sowohl nach der grösseren oder geringeren Menge der Flüssigkeit, welche sie fortschaffen sollen, als auch nach der mehr oder weniger beträchtlichen Höhe, auf welche sie die Flüssigkeit heben müssen, von einander. Doch gibt es auch mehrere Arten dieser Maschinen, die ohne Unterschied unter denselben Umständen zur Erreichung desselben Zwecks angewendet werden können. Um die Wahl zwischen diesen verschiedenen Maschinen zu treffen, muss man sie 1) unter dem Gesichtspunkt des gesammten Arbeitsverlustes, welcher durch die eigenthümliche Construktion einer jeden von ihnen bedingt ist, und 2) unter dem Gesichtspunkt der leichteren oder schwierigeren Aufstellung sowohl, als auch der mehr oder weniger bequemen Handhabung betrachten. Wenn die Maschine nur für einige Zeit in Thätigkeit bleiben und dann wieder entfernt werden soll, so muss man auf die Leichtigkeit der Aufstellung das Hauptgewicht bei der Wahl legen. Wenn im Gegentheil die Maschine an dem Orte, wo sie aufgestellt wird, bleiben und dortselbst auf längere Zeit ihre Thätigkeit ausüben soll, so muss man sein Augenmerk besonders darauf richten, die Arbeitsverluste so viel als möglich zu vermindern, und daher nur eine solche Maschine wählen, bei welcher dieselben so gering als möglich sind.

§. 395. **Paternosterwerk.** — Das Paternosterwerk ist eine Maschine, welche dazu bestimmt ist, das Wasser nur auf eine geringere Höhe zu heben. Man wendet es besonders zum Ausschöpfen des Wassers in den Fällen an, wo man unter dem Niveau eines Flusses zu arbeiten hat, wie z. B. bei der Fundirung von Brücken oder Wassermühlen. Zu diesem Zwecke sperrt man den Theil des Wassers, in welchem gearbeitet werden soll, durch einen sog. Fangdamm von dem übrigen Wasser ab und schöpft alsdann das Wasser aus dem so umschlossenen Raum mittelst des Paternosterwerks. Diese letztere Operation muss während der ganzen Dauer der Arbeiten immer wieder von Neuem vorgenommen werden, um das Wasser, welches immer durch die Wände des Fangdammes dringt und selbst aus der Sohle des Flusses quillt, und das, wenn es sich anhäufen würde, die Arbeiten stören müsste, wieder fortzuschaffen.

Das Paternosterwerk besteht aus einer Kette ohne Ende (Fig. 513), deren einzelne Glieder von Eisen mittelst Scharnieren aneinander befestigt sind und die ihrer ganzen Länge nach mit Scheiben versehen ist, welche in der Mitte je eines Gliedes senkrecht auf demselben festsitzen. Diese Kette geht über den Umfang

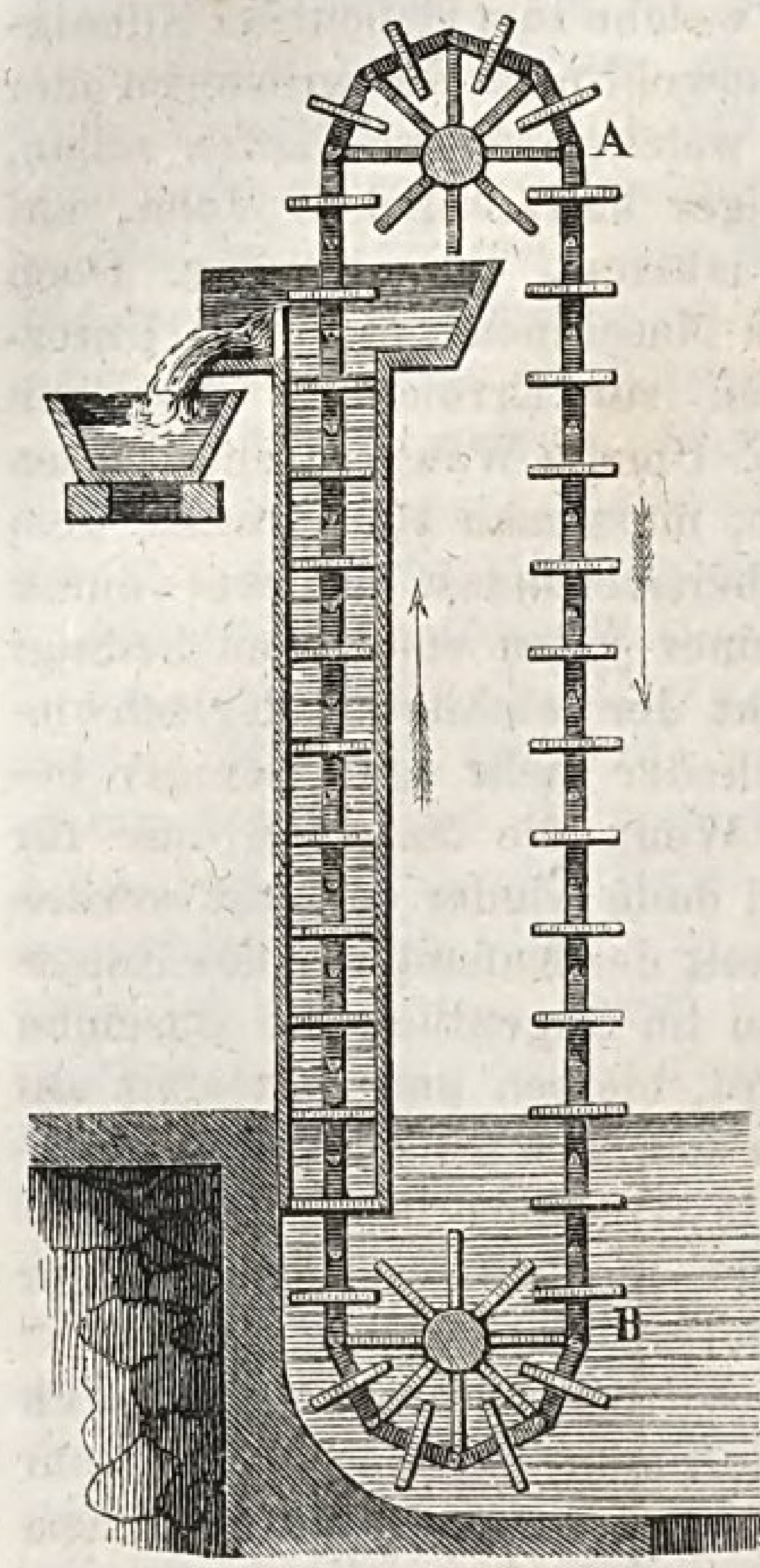


Fig. 513.

zweier Räder A und B. Indem man das Rad A herumdreht, wird die Kette mit fortgezogen und dreht nun ihrerseits das Rad B. Bei dieser Bewegung steigen die verschiedenen Theile der Kette auf der einen Seite in die Höhe, um auf der andern Seite wieder abwärts zu gehen, wie es die Pfeile in der Figur andeuten. Der aufsteigende Theil der Kette befindet sich innerhalb einer Röhre, deren Querschnitt nur sehr wenig grösser als die an der Kette befestigten Scheiben ist, und deren unteres Ende in das auszuschöpfende Wasser taucht. Jedesmal, wenn eine Scheibe, indem sie emporsteigt, in das Innere der Röhre eintritt, isolirt sie über sich eine gewisse Wassermenge, welche in der Röhre enthalten war; in dem Maasse, als dann die Scheibe in die Höhe steigt, hebt sie dieses Wasser mit sich empor und fördert es so bis zum obersten Theil der Röhre, wo es seitwärts ausfliesst. Um die Reibung zu vermindern, sind die Scheiben etwas kleiner als der innere Querschnitt der Röhre, aber diese Differenz muss so klein als möglich sein, damit nicht zu viel Wasser durch die Zwischenräume zwi-

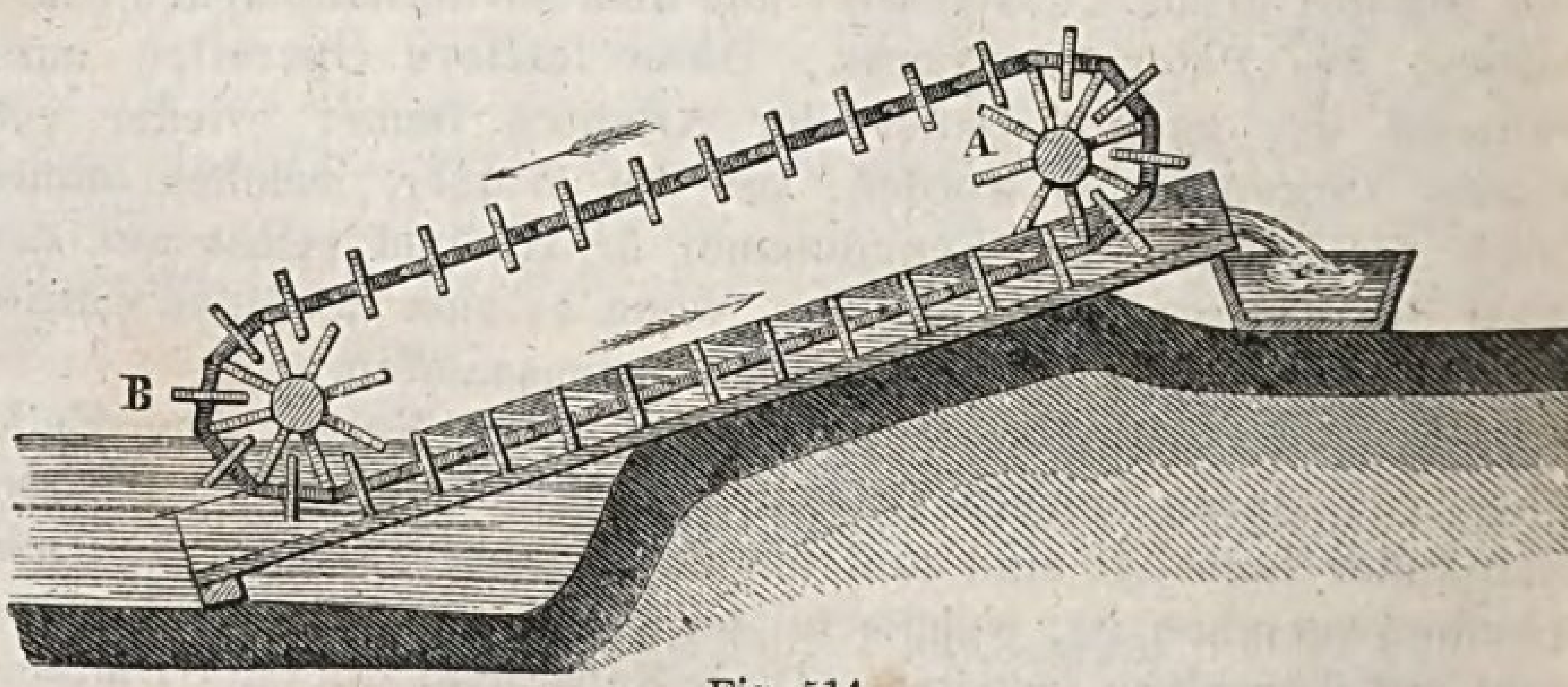


Fig. 514.

schen den Scheiben und der Röhre fällt und die daraus folgende Verminderung der Menge des gehobenen Wassers nicht zu beträchtlich wird.

Häufig gibt man dem Paternosterwerk, anstatt es, wie wir eben gesehen haben, vertikal zu stellen, eine geneigte Lage (Fig. 514). In diesem Fall kann die obere Seite der Röhre ganz abgenommen sein, sodass sich dieselbe in einen einfachen Kanal von Holz verwandelt, in welchem der eine Theil der Kette ohne Ende, welche das Paternosterwerk bildet, aufwärts steigt.

§. 396. **Noria.** — Die Noria ist eine Maschine, welche grosse Aehnlichkeit mit dem Paternosterwerk hat. Sie besteht wie dieses aus einer Kette ohne Ende, welche sich um den Umfang zweier Räder legt und welche ganz auf die nämliche Weise in Bewegung gesetzt wird. Aber anstatt dass diese Kette Scheiben trägt, welche das Wasser in einer Röhre oder in einem geneigten Kanal über sich emporsteigen machen, ist sie ihrer ganzen Länge nach mit Bechern oder Eimern versehen, welche die zu hebende Flüssigkeit enthalten. Diese Eimer steigen abwechselnd auf und nieder wie die Scheiben des Paternosterwerks. Wenn sie sich an dem untersten Theil ihres Weges befinden, füllen sie sich mit Wasser; mit diesem Wasser steigen sie in die Höhe und müssen dabei natürlich ihre Oeffnung nach oben gekehrt haben. Nahe dem oberen Rade angekommen, gehen sie um dieses Rad herum, und indem sie sich dabei mehr und mehr neigen, entleeren sie sich allmählich; mit der Oeffnung nach unten gekehrt, gehen sie nun abwärts, um sich unten von Neuem mit dem zu hebenden Wasser zu füllen. Die vertikale Röhre oder der geneigte Kanal, in welchem sich bei dem Paternosterwerk der aufsteigende Theil der Kette ohne Ende befindet, ist bei der Noria natürlich überflüssig und desshalb auch nicht vorhanden.

Die Noria wird nicht allein zum Schöpfen des Wassers angewendet. Man bedient sich ihrer in den industriellen Etablissements auch häufig, um verschiedene Flüssigkeiten, selbst feste Körper in gepulvertem Zustande von einem Stockwerk in ein höher gelegenes zu schaffen. So gebraucht man in den Getreidemühlen die Noria dazu, um die Mischung von Mehl und Kleie, wie sie zwischen den Mühlsteinen hervorkommt, in die Höhe zu fördern und in den Apparat zu führen, welcher die Trennung dieser beiden Substanzen bewerkstelligen soll.

Die Baggermaschinen, deren man sich bedient, um den für die Schifffahrt hinderlichen Sand in dem Bette eines Flusses auszuheben, sind nichts anderes als solche Norien, deren Eimer,

bis zur Sohle des Flusses niedersteigend, sich dort mit Sand füllen, welchen sie mit emporheben und in einen Kahn leeren, der dazu gehört, ihn fortzuschaffen. In diesem Fall sind die Wände der Eimer mit einer grossen Anzahl kleiner Löcher versehen, durch welche das Wasser, welches mit dem Sande gemischt ist, abfliessen kann. Diese Maschinen sind an den Seiten eines Kahnes befestigt, welchen man über die ganze Strecke wegführt, an welcher das Bett des Flusses vertieft werden soll; sie werden entweder durch einen Pferdegöpel oder durch eine Dampfmaschine, welche das Baggerschiff trägt, in Bewegung gesetzt.

§. 397. **Die Archimedische Wasserschraube.** — Um das Wasser aus geringeren Tiefen heraufzuschaffen, wendet man auch sehr häufig eine Maschine in Form einer Schraube an, die schon von *Archimedes* erfunden worden ist und daher seinen Namen trägt. Um uns klar zu machen, in welcher Weise diese Maschine wirkt, reduciren wir sie auf ihre einfachste Form. Denken wir uns dass eine Glasröhre so um einen Cylinder gewickelt werde, dass sie die Form einer Schraubenlinie annimmt (Fig. 515), und dass dem so gebildeten Apparat, in eine geneigte Lage gebracht, mittelst einer an seinem oberen Ende befestigten Kurbel eine Rotationsbewegung um die Achse des Cylinders ertheilt werden kann. Wenn man diese Maschine dreht, so beschreibt das untere Ende a der Glasröhre die Peripherie eines Kreises, dessen Ebene, senkrecht auf der Achse des Cylinders stehend, gegen den Horizont geneigt ist. Die Peripherie dieses Kreises taucht theilweise in das empor zu hebende Wasser, theilweise ragt sie über das Niveau desselben heraus; das Ende a der Glasröhre dringt also einmal in dieses Wasser ein, dann tritt es über den Spiegel desselben hervor, um von Neuem wieder unterzutauchen u. s. f. Vorausgesetzt, dass die Maschine im richtigen Sinne gedreht wird, so

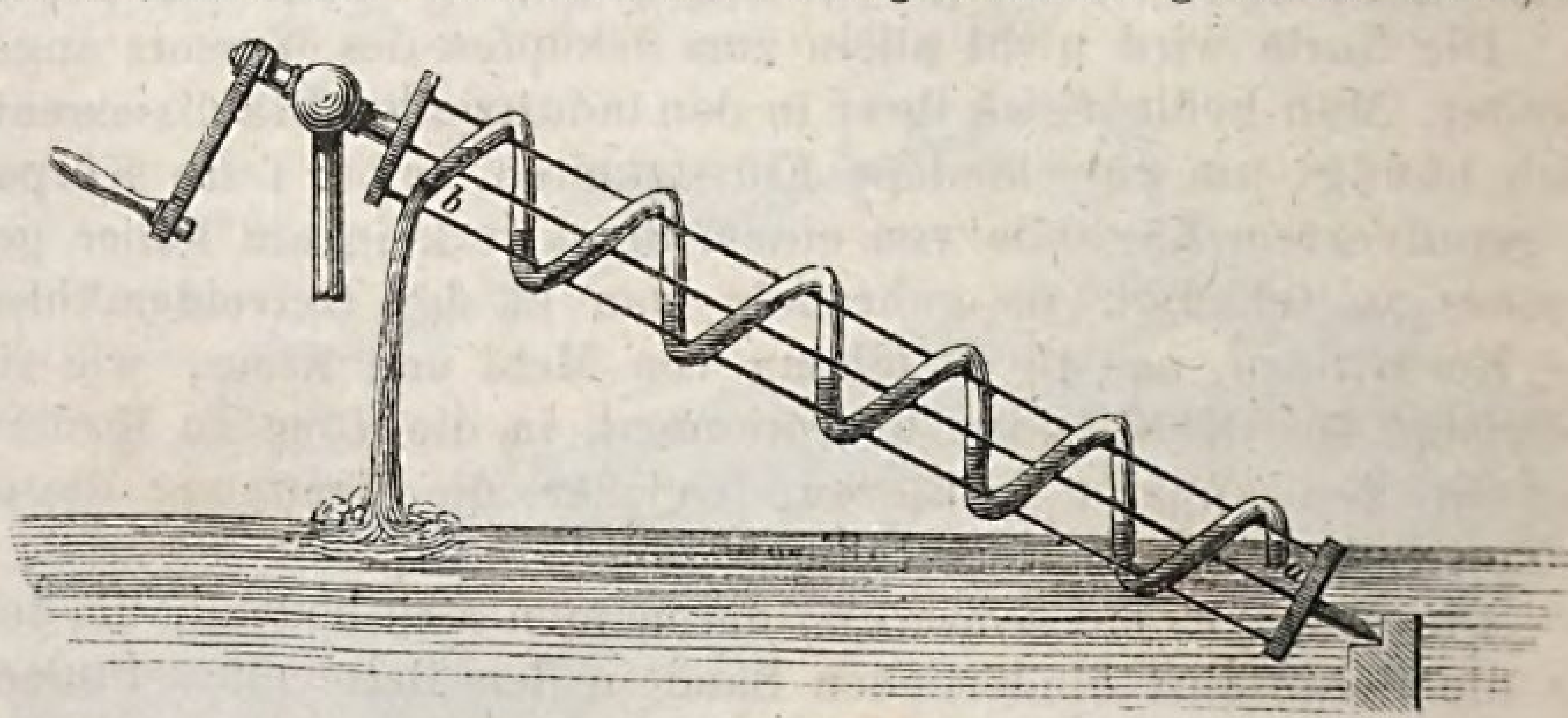


Fig. 515.

enthält die Röhre in dem Augenblick, wo das untere Ende derselben aus dem Wasser wieder hervortritt, eine gewisse Menge Flüssigkeit, welche auf diese Weise von der übrigen Flüssigkeitsmasse abgesperrt wird und bei der fortgesetzten Drehung der Maschine in jedem Augenblick den untersten Theil der Schraubenwindung, in welcher sie sich eben befindet, einnimmt. Sie steigt so während der Drehung allmählich längs des Cylinders empor, um endlich an dem obersten Ende desselben auszufliessen.

Bei jeder Umdrehung des Cylinders gelangt eine neue Menge Flüssigkeit in die Röhre, sodass dieselbe bald in jeder ihrer Windungen Flüssigkeit enthält. Diese verschiedenen Wassermassen, die gleichzeitig gehoben werden, sind durch Zwischenräume, die mit Luft ausgefüllt sind, von einander getrennt. Die Luft drang in die Röhre ein, während sich ihr Ende a über der freien Oberfläche der zu hebenden Flüssigkeit befand. Wenn man den Gang der Maschine mit Aufmerksamkeit verfolgt, so sieht man, dass in Folge der Neigung der Achse der Schraubenlinie die Luftmengen, die auf diese Weise in die Röhre eingeführt wurden, gezwungen werden, ein grösseres Volumen einzunehmen, sobald die Oeffnung a wieder unter das Wasser getreten ist. Die Spannkraft dieser Luft muss also kleiner werden und daraus folgt, dass der Druck der atmosphärischen Luft, welcher frei auf das Ende b der Röhre ausgeübt werden kann, einen Theil jeder der Wassermengen, die in den Windungen enthalten sind, in die unter ihr liegende Windung zurückfallen macht. Um diese nachtheilige Wirkung zu vermeiden, kann man in der Glasröhre in gewissen Entfernungen von einander sehr kleine Löcher anbringen, welche die äussere Luft eindringen lassen, während das Wasser gar nicht oder doch nur in sehr unerheblicher Menge durch dieselben ausfliessen kann. In Folge dieser Anordnung dringt in dem Moment, wo sich die zwischen zwei getrennten Wasserportionen enthaltene Luft auszudehnen strebt, äussere Luft durch einige jener Löcher herein und die Spannkraft der inneren Luft sinkt nur sehr unbedeutend unter die der äusseren herab.

Es ist unerlässlich, dass das Ende a der Glasröhre bei jeder Umdrehung des Cylinders über den Spiegel des zu hebenden Wassers hervor tritt; denn ohne dieses würde das Wasser, welches in die Röhre eingedrungen ist, nicht von der übrigen Flüssigkeit getrennt und könnte daher auch nicht gehoben werden; man sieht in der That, dass in diesem Fall die Glasröhre und das untere Reservoir, in welches sie taucht, ein System von communicirenden Gefässen bilden würden, und dass folglich die

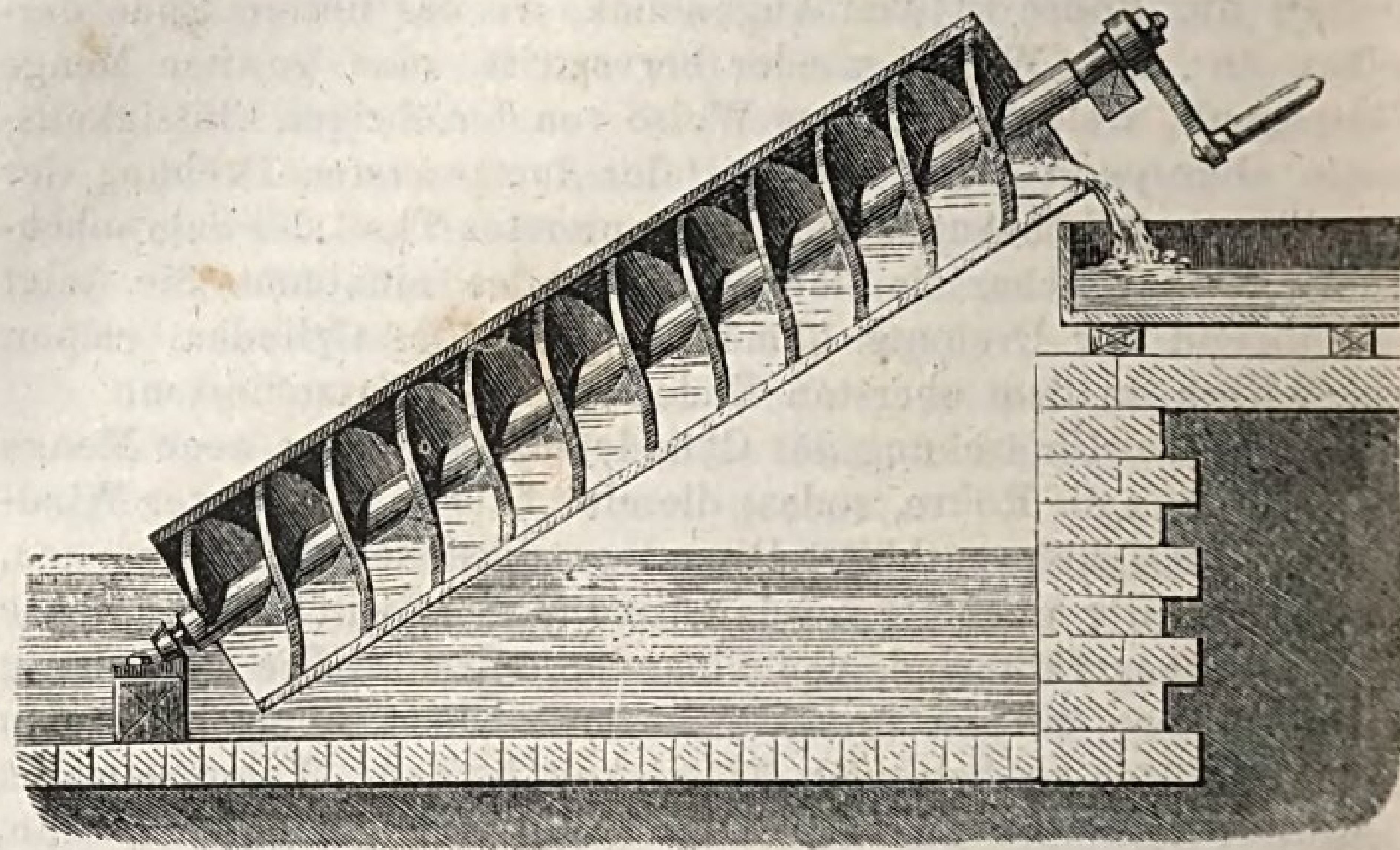


Fig. 516.

freien Oberflächen in der Röhre wie im Reservoir stets in derselben Höhe stehen müssten. Die kleinen Löcher, welche längs der Röhre angebracht sind, und von denen wir soeben gesprochen haben, können indessen dieses Resultat modificiren, indem sie der äusseren Luft den Zutritt in die Röhre gestatten und in derselben eine gewisse Wassermenge von der übrigen Flüssigkeit absondern.

Die Archimedischen Wasserschrauben, wie man sie in der Praxis zum Schöpfen des Wassers anwendet, sind nicht so construirt wie diejenige, von der wir eben gesprochen haben. Sie bestehen aus einem inneren massiven Cylinder, der, so zu sagen, den Kern bildet (Fig. 516), um welchen sich eine Scheidewand in Form einer Schraubenfläche seiner ganzen Länge nach herumwindet. Um diese Scheidewand ist eine cylindrische Hülse gelegt und an den Rändern derselben befestigt. Die vordere Hälfte dieses Hohlcylinders ist in der Abbildung abgenommen gedacht, um die innere Anordnung, sowie die Art und Weise, wie sich das Wasser in den verschiedenen Abtheilungen, welche durch die Windungen der Schraubenfläche gebildet werden, stellt, sichtbar zu machen. Häufig nimmt man anstatt einer Schraubenfläche deren zwei und selbst drei, die sich alle nach der ganzen Länge des Kerns in dem nämlichen Sinne um denselben herumwinden und fortwährend parallel zu einander bleiben, ähnlich wie bei den mehrfachen Schrauben (§. 94). In Fig. 516 ist die Schraube aus zwei Windungen dieser Art gebildet. Gewöhnlich kann bei den Archi-

medischen Wasserschrauben, die in dieser Weise construirt sind, die Luft im Innern längs des ganzen Kerns frei circuliren, und man begegnet daher bei ihnen den Uebelständen, welche von der Ausdehnung der Luft, die zwischen den, in zwei aufeinanderfolgenden Windungen enthaltenen Wassermassen sich befindet, nicht mehr. Aus demselben Grunde ist es auch nicht mehr nothwendig erforderlich, dass die untere Basis des Cylinders nur theilweise in das zu hebende Wasser taucht.

§. 398. **Die holländische Wasserschraube.** — In Holland wendet man häufig eine Schöpfmaschine an, die nichts weiter als eine Modification der Archimedischen Wasserschraube ist. Denken wir uns, dass man in dieser letzteren (Fig. 515) die cylindrische Hülse, welche die Räume zwischen den Windungen der Schraubenflächen von aussen absperrt, weggenommen habe, sodass nichts als diese Flächen selbst und der cylindrische Kern, an welchem sie befestigt sind, übrig bleibt; denken wir uns ferner, dass eine solche Schraube in das Innere eines cylindrischen Kanals gelegt werde, in welchem sie sich drehen kann und mit dessen Wänden die äusseren Ränder der schraubenartig gewundenen Scheidewände fast in Berührung sind, so haben wir dadurch die holländische Wasserschraube erhalten. Indem man dem Kerne und mit ihm den Scheidewänden eine Rotationsbewegung ertheilt, wird das Wasser ebenso emporgehoben wie in der Archimedischen Schraube. Offenbar fällt hier immer ein Theil des gehobenen Wassers durch die Zwischenräume zwischen den Rändern der Schraubenfläche und den Wänden des Kanals in das untere Reservoir wieder zurück; um den Verlust an Arbeit, welcher daraus folgt, so viel als möglich zu vermindern, muss man dafür sorgen, dass jene Zwischenräume nur ebenso gross sind, dass keine Reibung stattfinden kann; ausserdem wird der Uebelstand, den wir eben bezeichnet haben, durch einen Vortheil, den die holländische vor der Archimedischen Schraube voraus hat, wieder aufgewogen. Bei der letzteren Maschine ruht das ganze Gewicht des Wassers, welches sie enthält, auf der Achse, um welche sie sich dreht; bei der holländischen Schraube dagegen tragen die Wände des Kanals, welcher sie theilweise umschliesst, eine der Componenten des Gewichts dieses Wassers, diejenige nämlich, welche senkrecht auf die Achse des Kanals gerichtet ist; die Schraube selbst hat also nur noch die Componente, die parallel zu ihrer Achse ist, zu tragen. Daraus folgt, dass die Reibung der Achse in ihren Lagern bei der holländischen Schraube weniger gross ist als bei der Archimedischen.

Die Wasserschrauben der letztbeschriebenen Art werden in grosser Anzahl in Holland angewandt, um das Wasser, welches sich in tief liegendem Terrain, sei es in Folge des Regens, sei es durch Filtration durch die Erde hindurch, angesammelt hat, über die Dämme hinwegzuschaffen. Gewöhnlich werden diese Maschinen durch Windmühlen getrieben.

Schrauben, ähnlich wie die holländische, wendet man auch häufig an, um feste Körper in pulverförmigem Zustande auf geringere Entfernung fortzuschaffen. Zu dem Ende legt man eine solche Schraube horizontal in eine Art von Kanal, dessen ganze Länge sie einnimmt. Diese Schraube, welcher eine drehende Bewegung um ihre Achse gegeben wird, ergreift die in einem Behälter, der sich an einem Ende des Kanals befindet, angesammelte pulverförmige Masse; diese geräth dadurch zwischen die Windungen der Schraube und wird auf diese Weise bis zum anderen Ende des Kanals geführt, wo sie in einen zweiten Behälter fällt. In den Getreidemühlen bedient man sich zu gleicher Zeit der Schraube, von der wir eben gesprochen haben, und der Noria (§. 396), um die Mischung von Mehl und Kleie, welche direkt von den Steinen kommt, von einem Punkt der Mühle zu einem anderen zu schaffen; die erstere dieser Vorrichtungen wird vorzüglich für den Transport jener Mischung im horizontalen, die letztere dagegen für den im vertikalen Sinne angewendet.

§. 399. **Das Wurfrad.** — Um das Wasser auf geringere Höhen zu heben, bedient man sich manchmal eines grossen Rades, dessen Umfang mit ebenen Schaufeln versehen ist. Die Fig. 517 zeigt ein Rad dieser Art, welches Wasser aus der Seine in das den Hafen zu St. Quen bei Paris bildende Bassin hebt. An der unteren Seite des Rades bewegen sich die Schaufeln, indem sie aufwärts steigen, in einem cylindrischen Gerinne oder Kropf; zu ihren beiden Seiten findet sich eine vertikale Mauer, welche sich bis zu einer genügenden Höhe erhebt, sodass die Schaufeln ringsum eingeschlossen sind und das Wasser, welches sich zwischen ihnen befindet, gezwungen wird, ihrer aufsteigenden Bewegung zu folgen. Wenn eine mit Wasser beladene Schaufel bei A ankommt, so ergiesst sich dieses Wasser über den Rücken des Gerinnes in das Bassin. Um dieses Abfliessen des Wassers zu erleichtern, hat man den Schaufeln im Verhältniss zu den Radien, welchen sie entsprechen, eine gewisse Neigung gegeben.

Das Rad wird durch eine Dampfmaschine in Bewegung gesetzt, welche mittelst eines Zahnrades, das in der Figur sichtbar

ist, auf dasselbe wirkt. Dieses Zahnrad greift in die Zähne, welche einer der Kränze, an welchen die Schaufeln befestigt sind, an seinem inneren Umfange trägt.

Nach der Art und Weise, wie die Wirkung der Dampfmaschine auf das Wurfrad übertragen wird, sieht man, dass die Achse dieses Rades nicht sehr stark durch die Wassermasse, welche es erhebt, belastet wird, und dass folglich der Druck dieser Wassermasse auf die Schaufeln zu keiner viel grösseren Reibung Anlass gibt, als wenn sich das Rad leer drehen würde; das Zahnrad, durch welches das Wurfrad in Bewegung gesetzt wird, übt auf dieses von unten nach oben einen Druck aus, der dem Drucke, welcher aus dem Gewichte des Wassers, das eben gehoben wird entspringt, zum grössten Theil aufhebt.

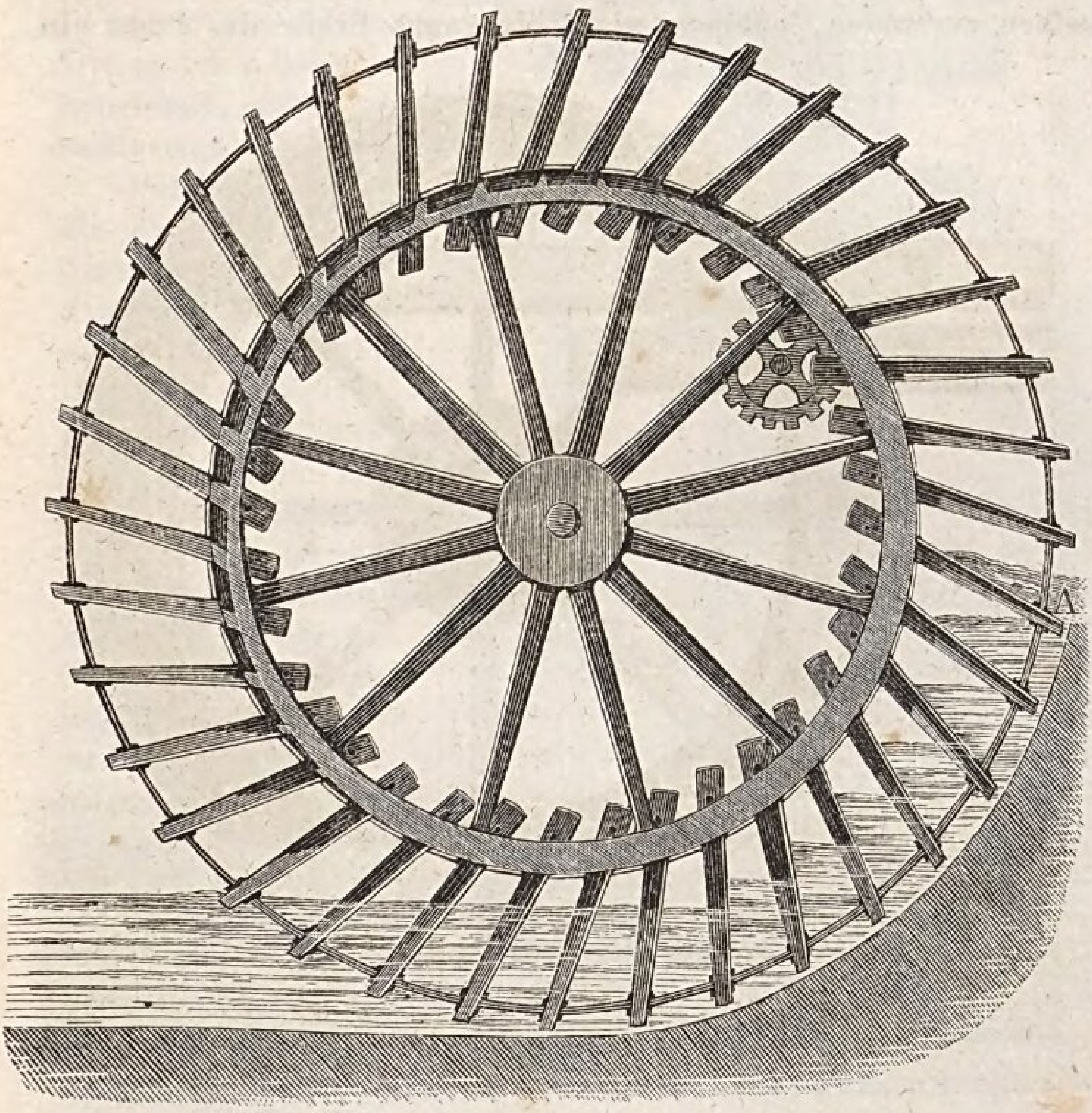


Fig. 517. (Maassstab 8 : 1000.)

§. 400. **Schöpfräder.** — Die Figuren 518 u. 519 zeigen ein Rad anderer Art, das aber einen ähnlichen Zweck zu erfüllen hat wie das oben beschriebene. Dieses Rad, welchem man den Namen Schöpfrad gegeben hat, trägt an seinem Umfang eine grosse Anzahl von Zellen oder Eimern, welche sich mit dem zu hebenden Wasser füllen und es wieder entleeren. Wenn das Rad im passenden Sinne in Rotation versetzt wird, so tauchen die Zellen unten in das zu hebende Wasser (Fig. 518), füllen sich daselbst von aussen und steigen gefüllt bis zu einer gewissen Höhe empor. Dortselbst angekommen, giessen sie das Wasser durch Oeffnungen, welche an dem inneren Umfange des Radkranzes angebracht sind, in Kästen B, C, von welchen es in die Gerinne D, E gelangt, in denen es weiter fliesst. Die Arme F, welche den Umfang des Rads mit der Welle desselben verbinden, nehmen nicht die ganze Breite des Rads ein

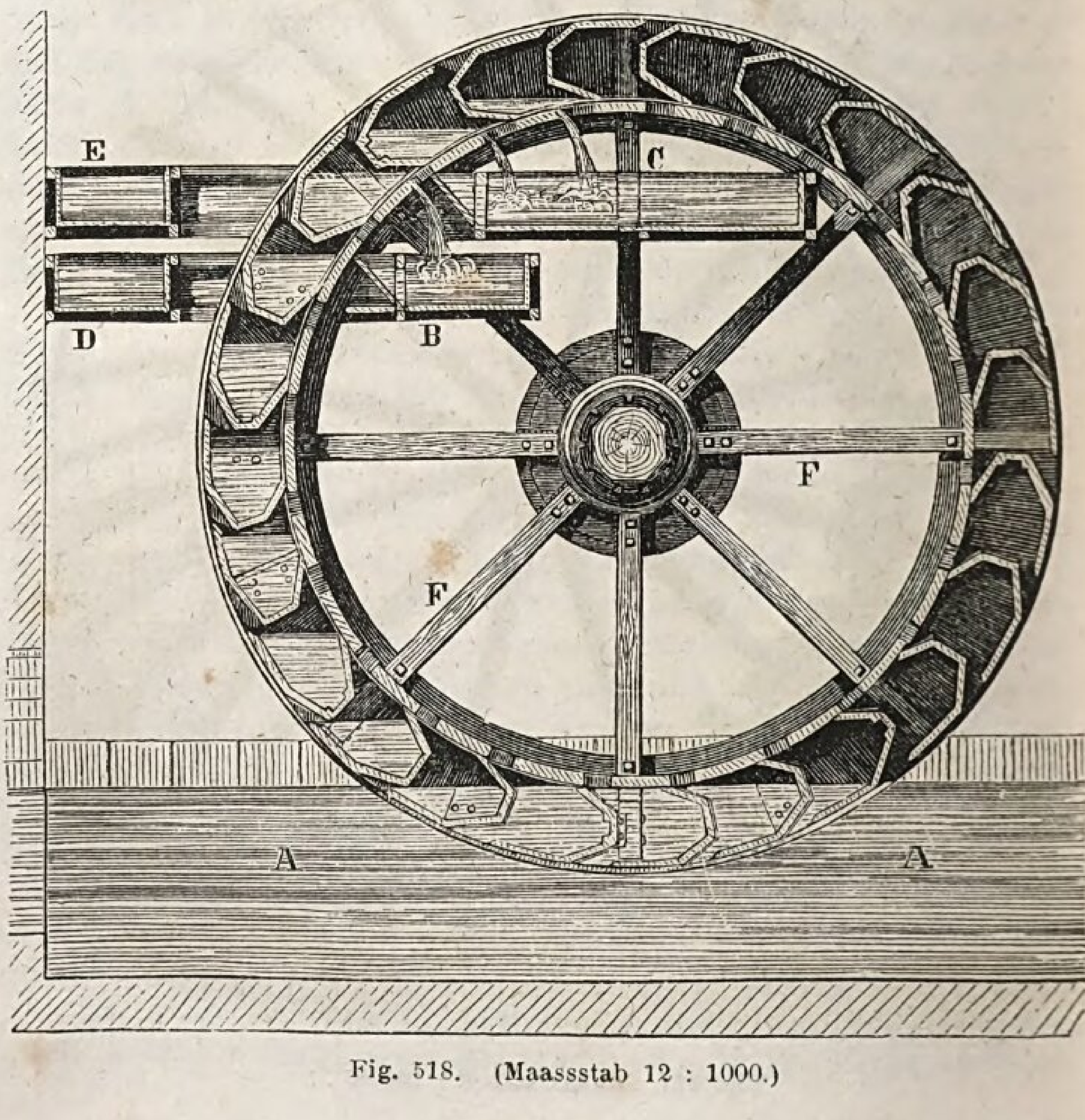


Fig. 518. (Maassstab 12 : 1000.)

(Fig. 519); sie gestatten dadurch den Kästen B C von beiden Seiten unter das Rad hereinzuragen, ohne die Bewegung desselben zu stören. Ein Wasserrad oder sonstiger hydraulischer Motor dreht die Welle G, deren Bewegung mittelst Zahnrädern auf die Welle des Schöpfrads übertragen wird.

Man sieht, dass hier die Welle des Rades das ganze Gewicht des Wassers, welches gehoben wird, zu tragen hat, wodurch eine bedeutende Reibung hervorgebracht wird. Aber andererseits sind auch die Verluste, welche bei dem vorhergehenden Rad immer stattfinden, indem das Wasser durch die Zwischenräume zwischen den Schaufeln und dem Gerinne herabfällt, nicht zu befürchten.

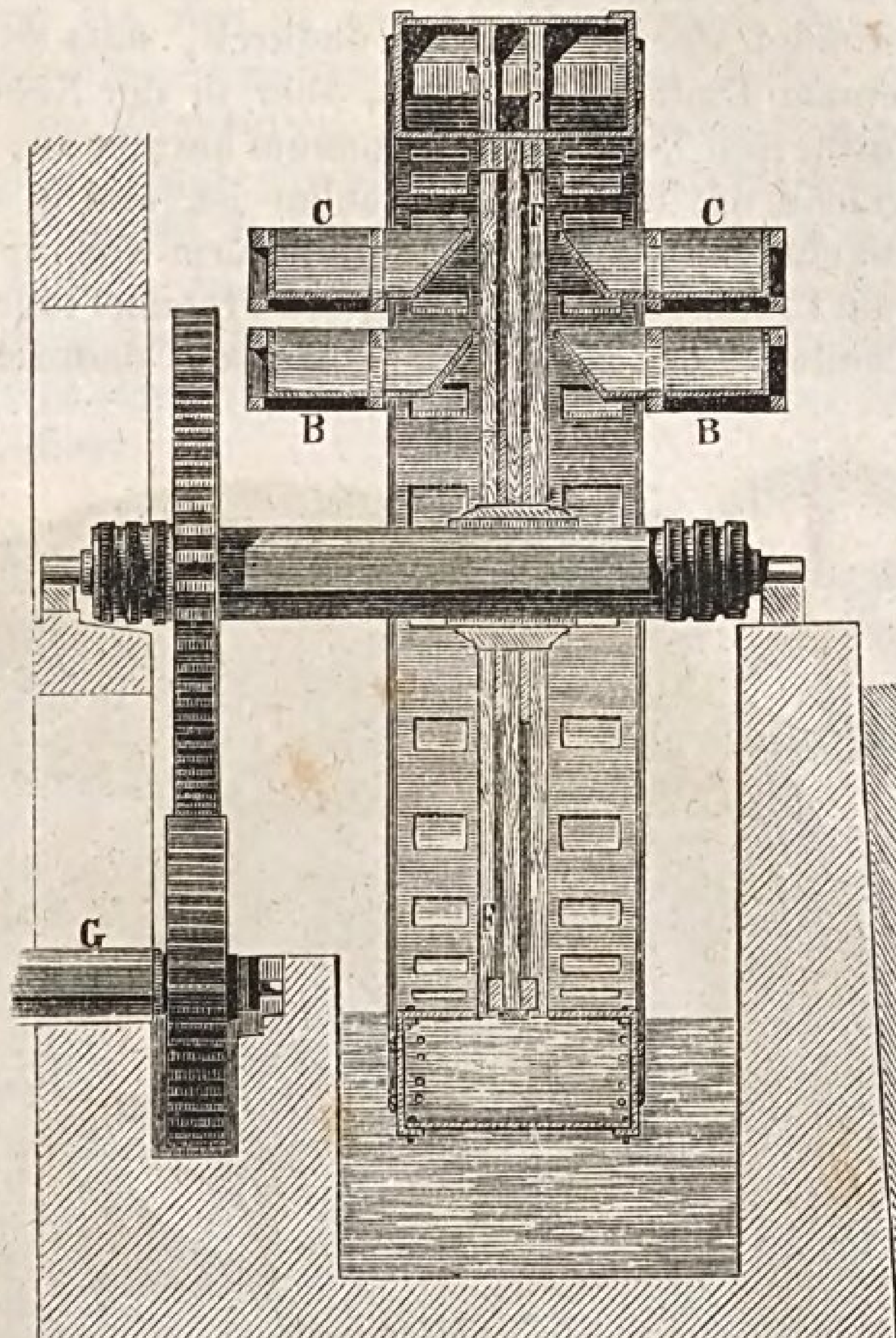


Fig. 519.

Das Rad, welches die Figg. 518 u. 519 darstellen, ist in Ciry Salsogne bei Soissons aufgestellt und wird dazu angewendet, Wasser aus dem Flusse Vesle zu heben und damit die umliegenden Wiesen zu bewässern. Das Gerinne E (Fig. 518) führt das Wasser auf höher gelegene Punkte des zu bewässernden Terrains; das Gerinne D dagegen, gespeist aus dem Kasten B, welcher die erste Wassermenge, die aus den Zellen ausfliesst, empfängt, leitet das Wasser auf tiefer gelegene Stellen.

Die fränkischen Schöpfräder, wie sie an der Rednitz und Regnitz bei Fürth und Erlangen zur Wiesenbewässerung angewendet werden, sind im Grunde nichts Anderes als unterschlächtige Wasserräder, welche frei in den Fluss gehängt sind (vgl. unten §§. 423 und 427) und von diesem herumgetrieben

werden. Zu beiden Seiten derselben sind an ihrem Kranze in passender Richtung Eimer befestigt, die, wenn sie durch die Drehung des Rades unten ankommen, in den Fluss tauchen und sich mit Wasser füllen, das sie beim Aufwärtssteigen mit emporheben und oben in Gerinne ausgiessen, die es auf die zu bewässernden Wiesen abführen.

§. 401. **Das Tympanum.** — Das Tympanum. (Fig. 520 und 521) hat viel Aehnlichkeit mit dem Schöpfrad; es unterscheidet sich von diesem dadurch, dass es das Wasser zwar an seinem Umfang aufnimmt, aber in der Nähe seiner Achse wieder ausfliessen lässt. Das Tympanum besteht aus einer hohlen Trommel, welche um ihre Achse drehbar ist, und in welcher Scheidewände angebracht sind, die sich in Form von Spiralen von der Achse zum Umfange erstrecken. Diese Trommel taucht mit ihrem untersten Theile in das zu hebende Wasser; dadurch kann dieses Wasser

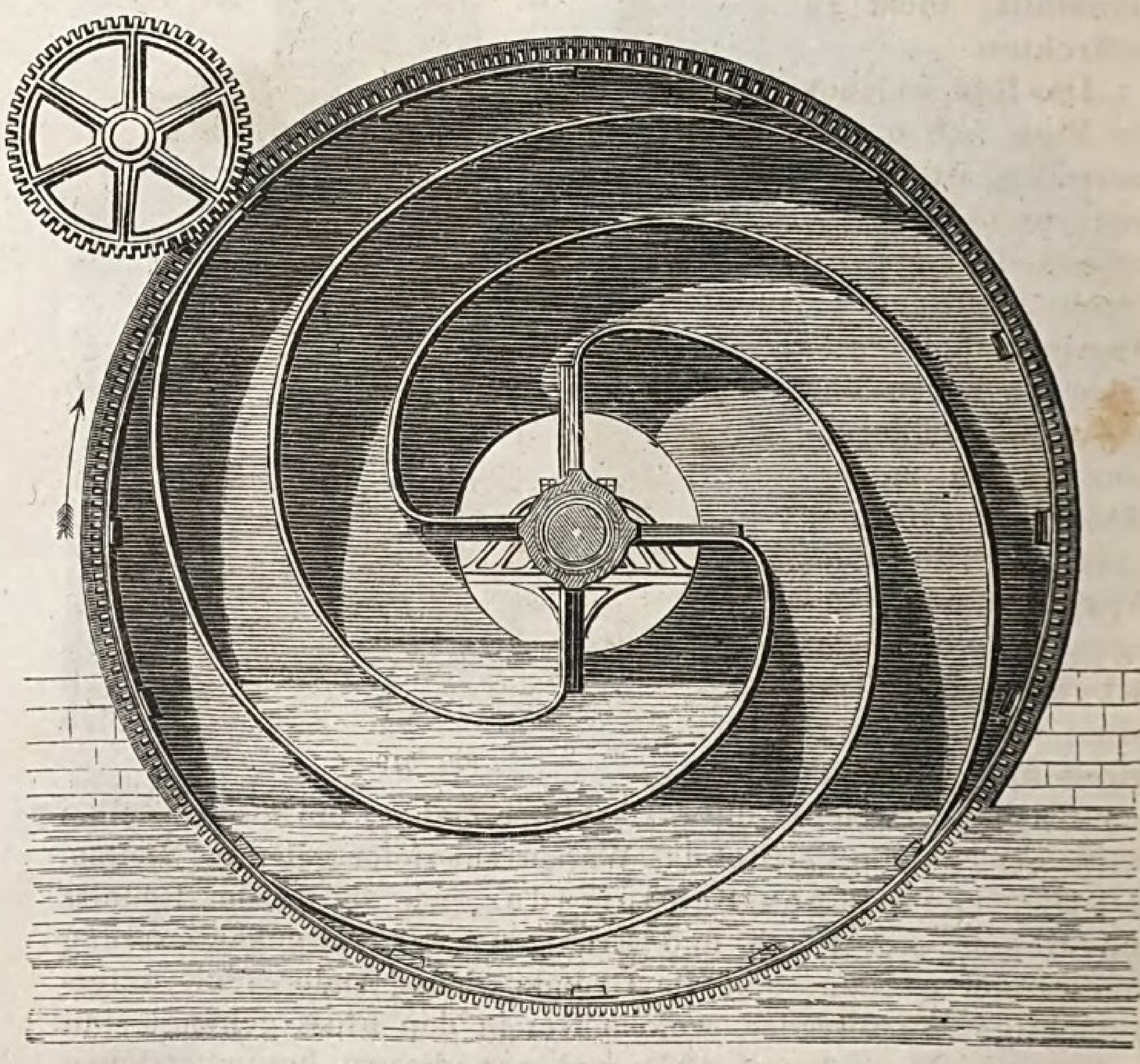
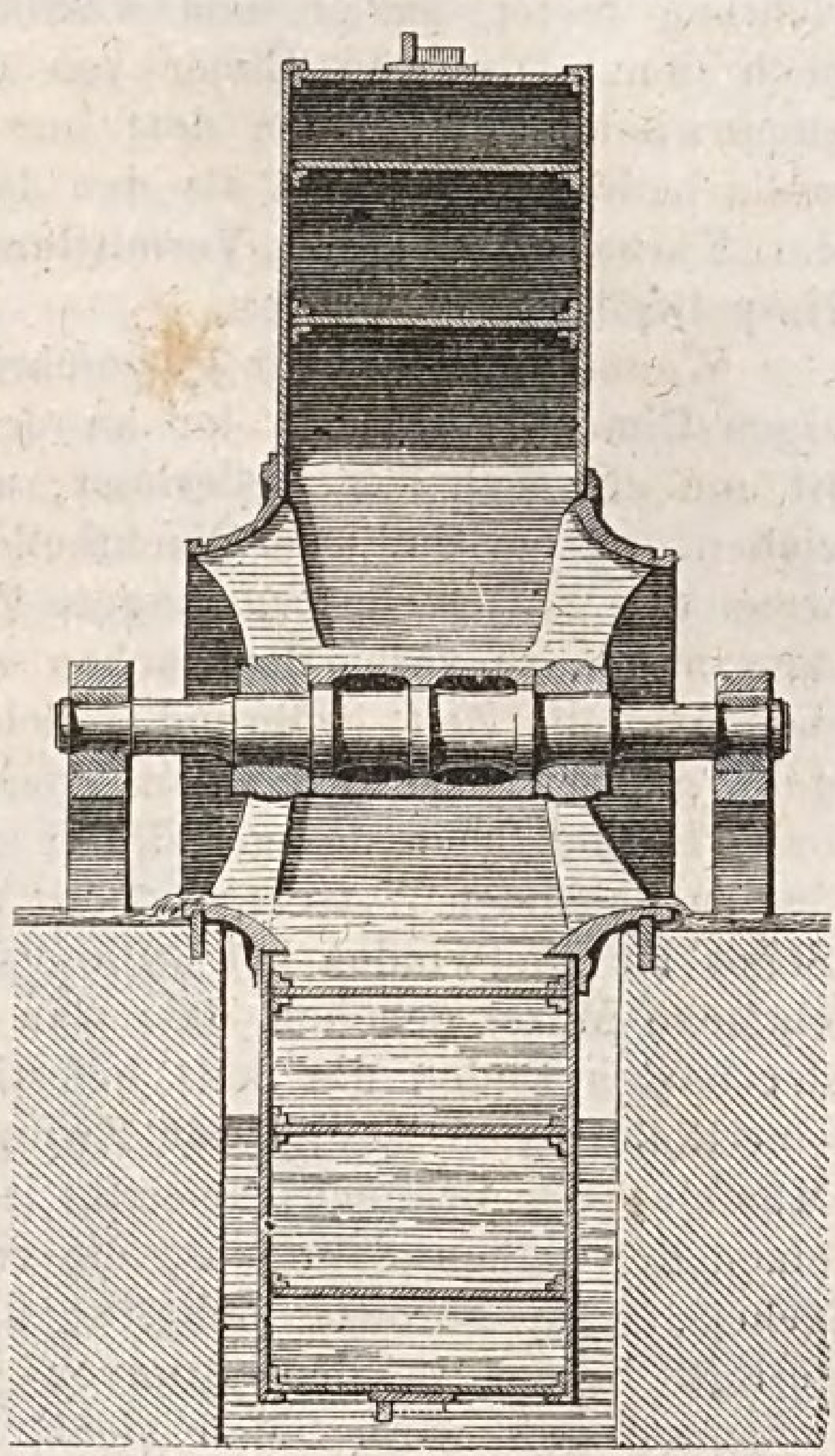


Fig. 520. (Maassstab 13 : 1000.)

in die durch die Scheidewände gebildeten Kammern eindringen und stellt sich in denselben, so lange es noch nicht von der übrigen Wassermasse abgesondert ist, ebenso hoch als aussen. Aber wenn das Tympanum in dem Sinne, wie es der Pfeil andeutet, in Drehung versetzt wird, so treten die Enden der Scheidewände, eines nach dem anderen, aus dem Wasser hervor, und dabei wird jedesmal eine gewisse Wassermasse in der betreffenden Kammer von der zu hebenden Flüssigkeit isolirt. Diese Wassermasse wird nun, indem sie sich immer an den tiefsten Punkt der Kammer, in welcher sie enthalten ist, zu stellen sucht, in dem Maasse, als sich das Tympanum dreht, allmählich emporgehoben, wobei sie sich, längs der Scheidewände hinfliessend, dem Mittelpunkt der Trommel mehr und mehr nähert. Wenn dadurch das Wasser endlich an den beiden Oeffnungen angekommen ist, welche rings um den Mittelpunkt an den beiden Seitenwänden des Tympanums angebracht sind, so fliesst es zu beiden Seiten durch diese Oeffnungen aus.

Das Tympanum, welches in den Figuren 520 und 521 dargestellt ist, wurde von *Cavé* construirt und ist in der Nähe von Avignon aufgestellt, wo es dazu dient, das zum Bewässern der Reissfelder nöthige Wasser zu heben. Es ist ringsum an seinem Umfange in der Mitte seiner Breite mit Zähnen versehen, in welche ein anderes kleines Zahnrad eingreift, das seine Bewegung von dem Motor erhält und auf diese Weise auf das Tympanum überträgt.


Fig. 521.

§. 402. Eimer. — Um das Wasser auf eine etwas grössere Höhe zu heben und besonders, um es aus einem vertikalen Schacht oder Brunnen herauszuschöpfen, wendet man sehr häufig einen

Eimer an, welcher an dem einen Ende eines hinreichend langen Seils hängt. Man lässt dieses Seil mit dem Eimer in den Brunnen nieder, bis er sich in dem Wasser, von dem ein Theil gehoben werden soll, befindet. Nachdem der Eimer etwas in das Wasser eingesunken ist, neigt er sich zur Seite und füllt sich allmählich mit der Flüssigkeit vollständig an; alsdann zieht man an dem Seil wieder an und hebt den mit Wasser gefüllten Eimer empor.

Es würde sehr unbequem sein, wenn man das Seil direkt mit den Händen fassen und den Eimer daran emporziehen wollte, da man, um das Anstossen und die Reibung des Eimers an den Brunnenwänden zu verhüten, das Seil immer in einiger Entfernung von diesen halten muss. Man verfährt daher gewöhnlich auf eine andere Art. Häufig lässt man das Seil über die Welle eines Haspels mit Kurbel gehen (§. 81), welche Welle horizontal über der Mündung des Brunnens liegt, sodass man nur an der Kurbel drehen darf, um den Eimer in die Höhe zu fördern. Diese Einrichtung bietet ausser dem Vortheil der Bequemlichkeit auch noch den, dass man Eimer von grösseren Dimensionen damit emporwinden kann; man darf nur den Halbmesser der Haspelwelle bedeutend kleiner als den der Kurbel machen oder auch die Kurbel erst durch Vermittlung von Zahnrädern auf die Haspelwelle wirken lassen.

Wenn man, wie wir es beschrieben haben, nur einen einzigen Eimer gebraucht, der an dem Ende eines Seils befestigt ist und den man leer niederlässt, um ihn gefüllt wieder aufzuziehen, so hat das zwei Nachtheile, die man besonders dann, wenn das Wasserschöpfen längere Zeit ohne Unterbrechung fortdauern soll, zu vermeiden suchen muss. Der erste besteht darin, dass man die Zeit, während welcher der leere Eimer abwärts geht, ganz verliert; der zweite kommt daher, dass man jedesmal beim Heraufziehen des gefüllten Eimers nicht allein das Gewicht des zu hebenden Wassers, sondern auch das des Eimers und des Seiles zu überwinden hat. Diese Nachtheile werden durch das einfache Mittel gehoben, dass man zwei Eimer, einen an jedem der beiden Enden des Seils befestigt und dieses letztere über eine Rolle gehen lässt, deren Zwinge vertikal über der Mitte der Mündung des Brunnens befestigt ist (Fig. 522). Wenn man den einen der beiden Seiltheile, die vertikal von der Rolle herabgehen, nach abwärts zieht, so steigt der an seinem Ende befestigte Eimer in den Brunnen hinab, während der andere emporgezogen wird. Man sieht, dass dabei immer der eine Eimer leer abwärts geht, während man den andern gefüllt

heraufzieht, und dass sich ausserdem die Gewichte der beiden Eimer selbst mittelst der Rolle das Gleichgewicht halten; man hat folglich in Wirklichkeit blos das in dem vollen befindliche Wasser zu heben. Was das Gewicht des Seils anbetrifft, das jedoch meistens nur von geringem Belang ist, so wirkt dasselbe bald als widerstehende, bald als bewegende Kraft. Die Gewichte der beiden Seilstücke, welche neben einander hängen, neutralisiren sich theilweise und es wirkt folglich blos der Ueberschuss des einen dieser Gewichte über das andere, und zwar die Bewegung verzögernd oder beschleunigend, je nachdem der volle Eimer tiefer oder höher als der leere steht.

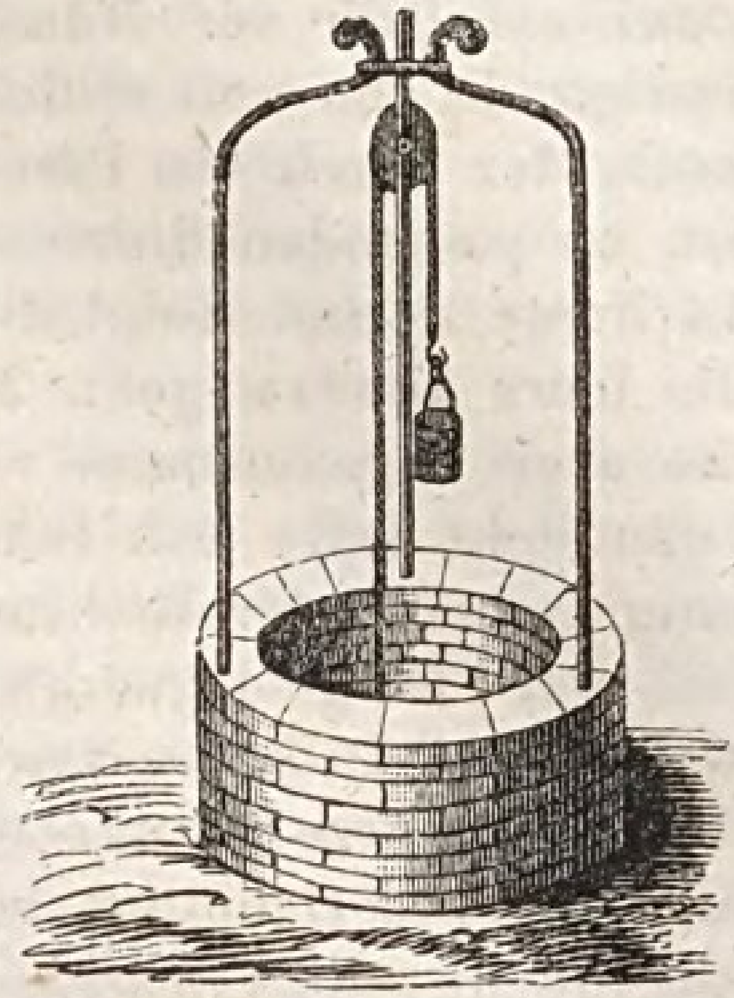


Fig. 522.

§. 403. **Göpel.** — Wenn man etwas beträchtliche Mengen Wasser aus einem Brunnen fördern soll, so kann man sich dazu auch noch der Eimer bedienen; man gibt ihnen aber dann bedeutend grössere Dimensionen und nennt sie nicht mehr Eimer sondern Tonnen. Ausserdem ersetzt man die Kraft des Menschen durch die des Pferdes oder des Dampfes, die man auf eine Art Göpel wirken lässt, um diese Tonnen in die Höhe zu fördern.

Als ein Beispiel dieser Art von Göpel geben wir in Fig. 523 den Pferdegöpel, welcher bei den Gemüsegärtnern in der Umgegend von Paris sehr ausgebreiteten Gebrauch findet. Das Seil, an dessen beiden Enden die zwei Tonnen hängen, geht über

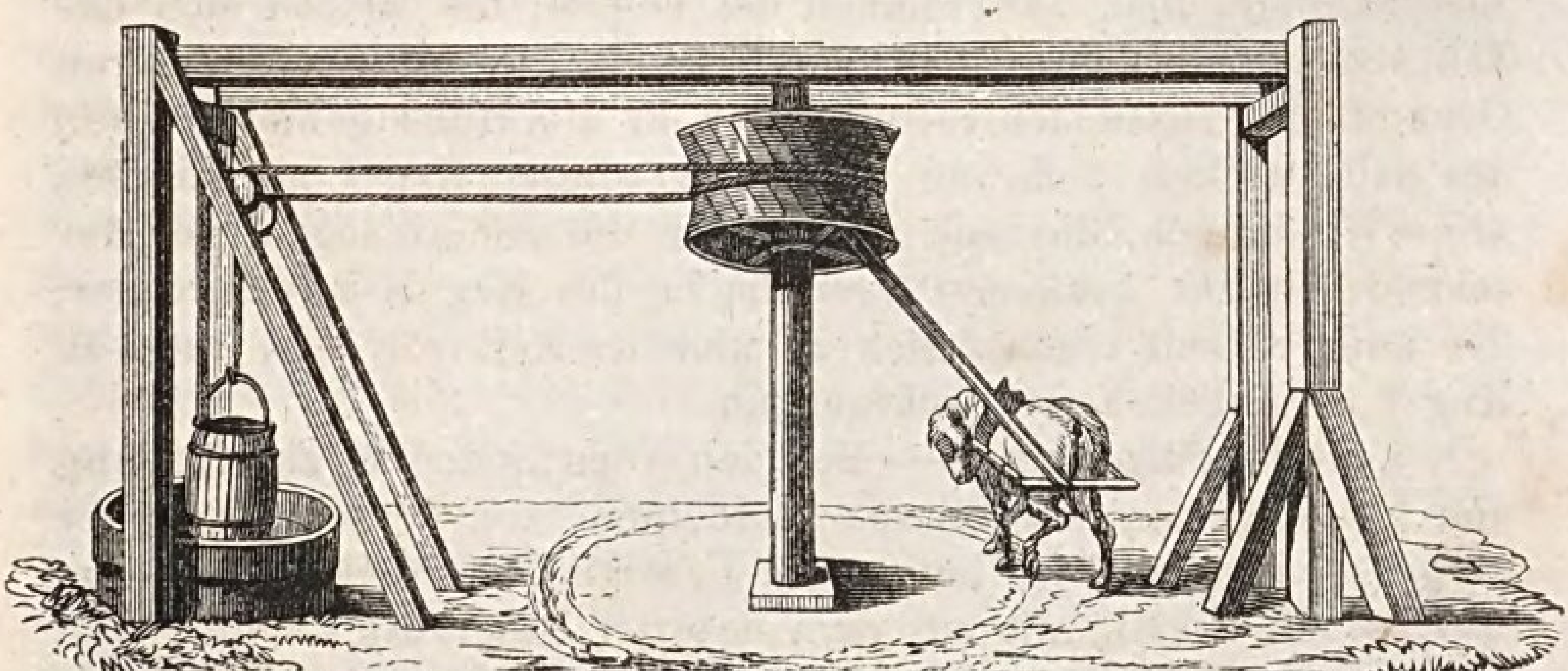


Fig. 523.

zwei oberhalb der Mündung des Brunnens nebeneinander befestigte Rollen und schlingt sich dann einigemal um einen Seilkorb, der durch ein Pferd, das an einen langen Hebel gespannt ist, im passenden Sinne um seine vertikale Achse gedreht wird. In Folge dessen steigt die gefüllte Tonne in die Höhe, während die leere abwärts geht. Natürlich muss sich das Pferd, während die oben angekommene volle Tonne entleert wird und die unten befindliche leere sich füllt, umkehren, um darnach den Göpel in entgegengesetzter Richtung drehen zu können.

Beim Bergbau geschieht manchmal die Förderung des Wassers, welches sich in den unterirdischen Gängen ansammelt, sowie die Förderung der Erze selbst ebenfalls in Tonnen, mittelst Göpel von ganz ähnlicher Construktion, wie wir soeben einen beschrieben haben; nur sind dieselben in bedeutend grösseren Dimensionen ausgeführt. Was die Gewichte der leeren Tonnen, sowie das des Seils betrifft, so gilt für dieselben etwas ganz Aehnliches wie das, was wir im vorigen Paragraphen gesagt haben; nur in Betreff des letzteren muss bemerkt werden, dass dasselbe im gegenwärtigen Fall, wo das Seil oft eine bedeutende Länge und Dicke haben muss, nicht mehr von so unbeträchtlichem Einfluss ist, als dort angenommen wurde. Dieser Einfluss besteht aber, wie oben angegeben wurde, darin, dass die zum Fördern der vollen Tonne erforderliche Kraft um so geringer wird, je höher sie nach und nach heraufkommt und je tiefer die andere hinabsteigt. Um diese Ungleichheit in der Wirkung des Seils auszugleichen, lässt man den in die Höhe gehenden Theil desselben an einem allmählich immer grösser werdenden, den abwärts gehenden Theil dagegen an einem nach und nach kleiner werdenden Hebelarm angreifen. Zu diesem Behufe bildet man die Trommel des Göpels, um welche sich das Seil schlingt, aus zwei konischen Theilen, die mit ihrer kleineren Grundfläche zusammenstossen. Der in die Höhe gehende Theil des Seils wickelt sich auf den einen dieser Kegel auf, indem seine Windungen, die sich eine neben die andere legen, von der schmäleren zur breiteren Grundfläche des Kegels fortschreiten; der andere Theil wickelt sich zu gleicher Zeit von dem anderen Kegel in umgekehrter Richtung ab.

§. 404. **Pumpen.** — Bei den verschiedenen zur Hebung von Flüssigkeiten bestimmten Maschinen, von denen wir bisher gesprochen haben, ist immer ein bewegliches Stück vorhanden, welches die Flüssigkeit aus dem unteren Reservoir schöpft, sich hierauf allmählich mit ihr erhebt und sie nicht eher abgibt, als bis sie in die gewünschte Höhe gekommen ist. Die P u m p e n

haben auch den Zweck, Flüssigkeiten zu heben, aber sie wirken in ganz anderer Weise. Die beweglichen Stücke, aus welchen auch sie zum Theil bestehen, und welche fast immer eine hin- und hergehende Bewegung erhalten, bewegen sich gewöhnlich nur längs eines sehr kleinen Theils der Höhe, auf welche die Flüssigkeit gehoben werden soll.

Eine Pumpe besteht im Allgemeinen aus einem geschlossenen Raum, dessen innere Dimensionen nach Belieben vergrössert oder verkleinert werden können und dessen Verbindung mit den Röhren, in welchen sich die Flüssigkeit bewegt, in den passenden Momenten abwechselnd hergestellt und wieder unterbrochen werden kann. Dem festen Theil dieses Raumes, der gewöhnlich cylindrisch ist, gibt man den Namen Pumpencylinder oder Pumpenstiefel. Der Kolben ist ein bewegliches Stück, das sich innerhalb des Pumpenstiefels befindet und sich genau, d. h. möglichst luft- und wasserdicht, an die Wände desselben anschliesst; indem er sich längs dieser Wände bewegt, ändert er den Voluminhalt des Raums, dessen eine Grenze er bildet. Die Verbindung des Pumpenstiefels mit den verschiedenen Röhren, in welchen sich die Flüssigkeit aufwärts bewegen soll, wird mittelst der sogenannten Ventile abwechselnd hergestellt und wieder unterbrochen.

§. 405. Die Ventile, welche man anwendet, haben sehr verschiedene Formen; wir begnügen uns, die wichtigsten derselben anzugeben.

Das Klappenventil (Fig. 524) besteht aus einer Metallplatte, die um ein Scharnier so beweglich ist, dass sie sich genau über die Ränder einer Oeffnung legen kann, die in dem Stücke angebracht ist, welches dieses Scharnier trägt; diese Platte ist gewöhnlich mit Leder besetzt, zu dem Zwecke, eine innigere Berührung zwischen ihr und den Rändern der Oeffnung, welche sie verschliessen soll, zu ermöglichen. Häufig hat das Klappenventil gar kein Scharnier, sondern ist aus einem einfachen Stück Leder gebildet, dessen einer Rand neben der Oeffnung, welche dieses Ventil verschliessen soll, festgemacht ist. In diesem Fall ersetzt die Biegsamkeit des Leders das Scharnier; damit aber andererseits diese Biegsamkeit das Ventil nicht verhindert, die Oeffnung genau zu verschliessen, befestigt man auf der oberen Fläche des Lederstücks eine Metallscheibe von kleinerer Dimension, welche ihm eine hinreichende Steifigkeit gibt, ohne sich indessen den Bewegungen, welche es annehmen muss, zu widersetzen.

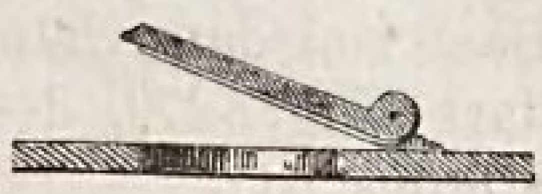
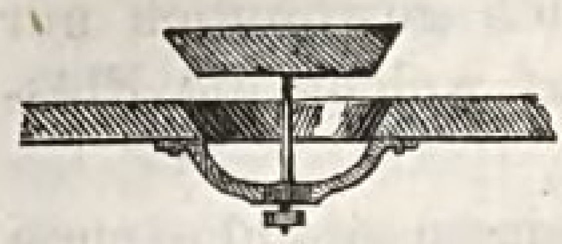
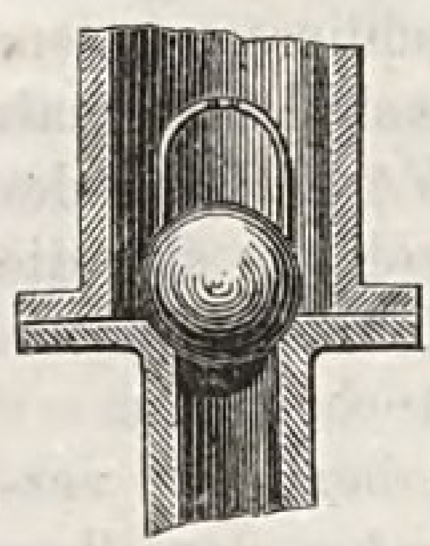


Fig. 524.

Das Kegelventil (Fig. 525) besteht aus einem abgestumpften metallischen Kegel, welcher eine Oeffnung, deren Ränder gleichfalls konisch zulaufen, genau verschliessen kann. Dieses Ventil ist mit einem Stiel versehen, der in seiner Mitte befestigt ist und dazu dient, es in seiner Bewegung zu führen. Zu diesem Zweck geht der Ventilstiel durch einen Bügel, welcher unter der Oeffnung angebracht ist, und endigt sich in einen Kopf, der dazu bestimmt ist, zu verhindern, dass sich das Ventil zu weit von der Oeffnung, welche es verschliessen soll, entfernt.

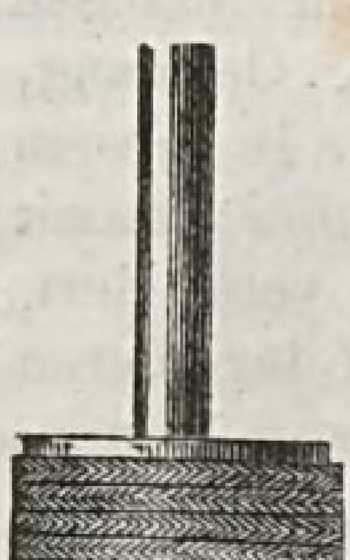

Fig. 525.

Das Kugelventil (Fig. 526) besteht aus einer Kugel, welche eine kreisrunde Oeffnung verschliesst, indem sie sich an die Ränder derselben anlegt. Dieses Ventil braucht nicht in seiner Bewegung geführt zu werden; die Regelmässigkeit seiner Gestalt hat zur Folge, dass es stets die Oeffnung genau verschliesst, von welcher Seite her es sich auch über dieselbe legt. Man hat nur nöthig, über der Oeffnung eine Art Korb anzubringen, um zu verhindern, dass sich das Ventil zu weit von dieser Oeffnung entfernt. Wenn ein Ventil dieser Art etwas grosse Dimensionen erhalten soll, so macht man es gewöhnlich hohl, damit es nicht zu schwer wird.


Fig. 526.

§. 406. Die Form eines Pumpenkolbens hängt natürlich von der Gestalt des Stiefels ab, in welchem er sich bewegen soll. Am häufigsten ist der Stiefel ein Cylinder mit kreisförmiger Basis; alsdann hat der Kolben gleichfalls die Gestalt eines Cylinders (Fig. 527), dessen Höhe gewöhnlich viel kleiner als die des Stiefels ist.

Da der Kolben mit seinem ganzen Umfang genau an die inneren Wände des Stiefels anschliessen und doch ausserdem auch längs dieser Wände leicht hingleiten können soll, so umwickelt man ihn gewöhnlich mit stark zusammengedrehten Hanfseilen oder auch mit ebenso vorgerichtetem Werg. Diese Vorrichtung, im Allgemeinen Liderung genannt, gibt dem Kolben an seinem Umfange einen gewissen Grad von Zusammendrückbarkeit und Elasticität, welche ihm gestattet, sich sehr genau an die Wände des Stiefels anzulegen, ohne dass daraus während der Bewegung des Kolbens eine zu grosse Reibung folgt. Wenn


Fig. 527.

der Kolben einige Zeit hindurch im Gebrauch war, so erfüllt die Liderung, welche sich unterdessen abgenützt hat, ihren Zweck nicht mehr vollständig; sie lässt zwischen sich und den Wänden des Stiefels einen gewissen Spielraum. Man ist alsdann genöthigt, von Neuem Hanfseile oder Werg um den Kolben herumzuwickeln, oder man macht es wohl auch so, dass man die noch vorhandene Liderung stark zusammen- und dadurch rings um den ganzen Umfang des Kolbens nach auswärts presst, wodurch dieser Umfang wieder einen grösseren Durchmesser erhält. Um auf diese zweite Art verfahren zu können, macht man den Kolben aus zwei Stücken in Form von Scheiben, welche übereinander gelegt und einander mehr oder weniger genähert werden können. Diese beiden, mit einander vereinigten Scheiben lassen auf ihrem ganzen Umfang eine Art Hals wie der Hals einer Rolle gebildet, frei, in welchem die Liderung aus Hanfseilen oder Werg gelegt wird. Indem man die beiden Scheiben mittelst Schraubenbolzen und Muttern einander nähert, kann man die Liderung zusammendrücken und in dem Maasse, als sie sich abnützt, nach auswärts pressen.

Eine andere Art von Kolben als die eben beschriebenen werden wir weiter unten in §. 415 kennen lernen.

Häufig muss man in dem Kolben selbst Oeffnungen, die mit Ventilen versehen sind, anbringen, um zwischen den beiden Theilen des Stiefels, welche durch den Kolben von einander getrennt werden, abwechselnd eine Verbindung herstellen und wieder unterbrechen zu können. In diesem Fall durchbohrt man gewöhnlich den Kolben durch zwei Oeffnungen, die zu beiden Seiten der Kolbenstange gelegen sind, und bringt an jeder derselben ein Klappenventil an (Fig. 528).

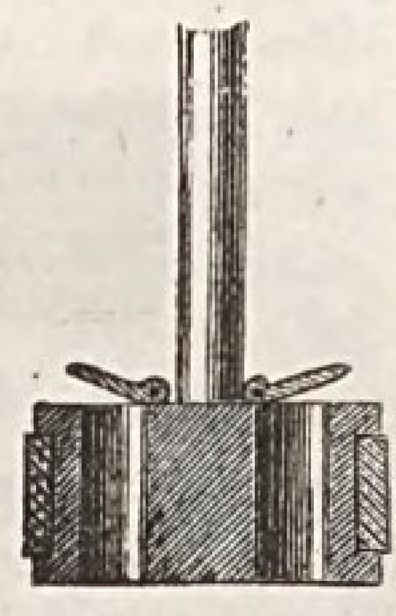


Fig. 528.

§. **407.** Man kann die Pumpen, je nach der Art und Weise, in welcher der Kolben wirkt, um das Wasser in die Höhe steigen zu machen, in drei Klassen theilen. Die erste enthält die Saugpumpen, die zweite die Druckpumpen und die dritte endlich die vereinigten Saug- und Druckpumpen.

Bei den Saugpumpen (Fig. 529) erhält der Kolben A in dem Stiefel B, welcher durch die Saugröhre C mit dem Reservoir, aus welchem das Wasser in die Höhe geschafft werden soll, in Verbindung steht, eine auf- und abwärts gehende Bewegung. An dem oberen Ende der Röhre C ist ein Ventil D angebracht, das sich von unten nach oben öffnet; ausserdem gehen durch den Kolben eine oder zwei Oeffnungen, deren jede gleichfalls durch

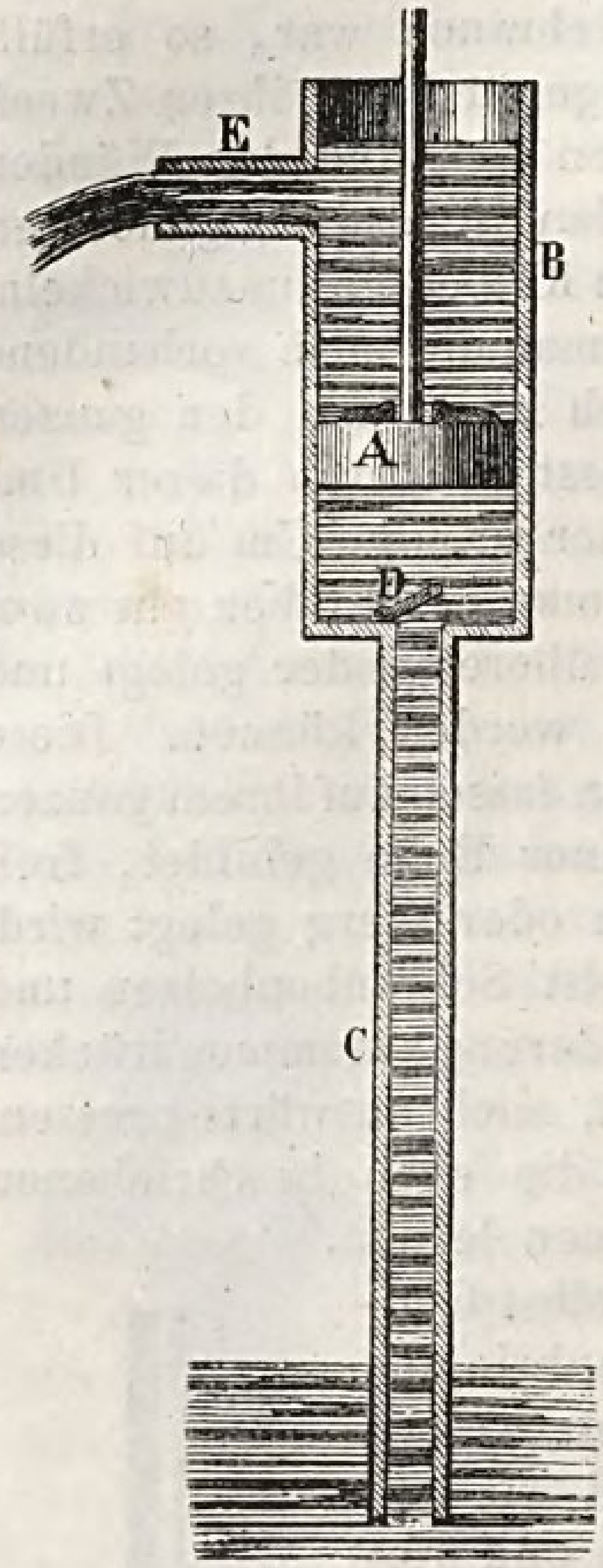


Fig. 529.

ein von unten nach oben sich öffnendes Ventil geschlossen ist. An dem oberen Theil des Stiefels befindet sich eine Seitenröhre E, durch welche das Wasser, welches die Pumpe liefert, ausfliesst.

Setzen wir voraus, dass die Pumpe schon einige Zeit in Thätigkeit sei, und sehen wir, auf welche Art das Wasser durch die hin- und hergehende Bewegung des Kolbens gehoben wird. Wenn der Kolben in die Höhe geht, so schliessen sich die Ventile, mit denen er versehen ist, wodurch die Verbindung zwischen dem oberen und unteren Theil des Stiefels unterbrochen wird; es müsste also unter dem Kolben ein luftleerer Raum entstehen; aber das Wasser steigt in Folge des Saugens, welches durch den Kolben hervorgebracht wird (§. 309), mit demselben in die Höhe, sodass es fortwährend mit seiner unteren Fläche in Berührung bleibt. Zu gleicher Zeit hebt der in die Höhe gehende Kolben das Wasser, welches sich über ihm befindet, und macht es durch die Röhre E ausfliessen. Während dieser aufsteigenden Bewegung des Kolbens bleibt das Ventil D fortwährend geöffnet. Wenn hierauf der Kolben abwärts geht, so sucht das Wasser, welches vorher von unten in den Stiefel eingedrungen ist, wieder in die Saugröhre C zurückzukehren; aber das Ventil D schliesst sich nun, und das Wasser, das auf dieser Seite keinen Ausweg mehr findet, öffnet die Ventile des Kolbens und stellt sich, indem es durch den Kolben hindurch dringt, über denselben. Eine neue aufsteigende Bewegung des Kolbens macht diese Wassermasse, die soeben über ihn zu stehen gekommen ist, durch die Röhre E ausfliessen; zu gleicher Zeit wird eine neue Quantität Wasser in den Stiefel aufgesaugt u. s. f.

Wenn wir den Vorgang, welcher während des Niedergehens des Kolbens statt hat, näher untersuchen, so sehen wir alsbald, dass, da die Kolbenventile geöffnet sind, die Flüssigkeit, welche unter dem Kolben gelegen ist, frei mit der über ihr befindlichen Flüssigkeit communicirt; folglich müssen auch die Drückungen,

welche er von beiden Seiten her zu erleiden hat, nahezu die nämliche Grösse haben. Ein Unterschied zwischen diesen Drückungen kann nur davon herkommen, dass die beiden Flächen des Kolbens nicht in gleicher Höhe liegen, und dass die Flüssigkeit, während sie die Oeffnungen des Kolbens durchdringt, einen mehr oder weniger grossen Widerstand erfährt. Beide Ursachen sind aber von sehr geringem Belang, zumal wenn man, wie es immer geschieht, dafür sorgt, dass die Oeffnungen durch den Kolben so weit als möglich sind. Man kann also annehmen, dass der Kolben, dessen Gewicht ausserdem noch im entgegengesetzten Sinne der Resultante der oben besprochenen Drückungen wirkt, keinerlei Widerstand zu überwinden hat, um den Stiefel von oben nach unten zu durchlaufen. Dies ist aber nicht mehr so, wenn der Kolben in die Höhe geht; er ist dabei wie ein massiver Kolben zu betrachten, und hat, wie wir sogleich sehen, auf seinen beiden Flächen verschiedene Drückungen zu erleiden. Auf seiner oberen Fläche erfährt er den Druck der atmosphärischen Luft, vermehrt um das Gewicht der Wassersäule, welche über ihm steht. Auf seiner unteren Fläche dagegen erfährt er den Druck der atmosphärischen Luft, vermindert um das Gewicht einer Wassersäule, welche diese seine Fläche zur Basis und zur Höhe den vertikalen Abstand derselben Fläche von der freien Oberfläche des Wassers in dem Reservoir hat, woraus das Wasser durch die Pumpe gehoben werden soll. Der Unterschied der Drückungen, welche auf die beiden Flächen des Kolbens bei seiner aufsteigenden Bewegung ausgeübt werden, ist folglich gleich dem Gewichte einer Wassersäule, die die Fläche des Kolbens zur Basis und zur Höhe den vertikalen Abstand der Ausflussröhre E vom Niveau des Wassers in dem Reservoir hat, aus welchem es geschöpft werden soll. Unter Berücksichtigung der passiven Widerstände, welche sowohl bei der Bewegung der festen Theile der Pumpe, als auch bei der des Wassers zu überwinden sind, erhält man aus Obigem die Kraft, die zur Bewegung des Kolbens aufgeboten werden muss.

Es ist klar, dass die Pumpe überhaupt nur dann eine Wirkung haben kann, wenn die untere Fläche des Kolbens niemals in eine grössere Entfernung über die Oberfläche des Wassers im unteren Reservoir zu stehen kommt, als die Höhe der Wassersäule beträgt, welche dem Drucke der atmosphärischen Luft das Gleichgewicht zu halten vermag. Diese Höhe ist aber nach §. 301 im Mittel gleich $10^{m},33$. Wenn die eben angegebene Bedingung nicht erfüllt wäre, so würde sich das Wasser nicht bis

zur unteren Fläche des Kolbens erheben: es würde in gewisser Höhe stehen bleiben, sei es in der Röhre C oder auch schon im Pumpenstiefel, ohne dem Kolben in seiner aufsteigenden Bewegung zu folgen; es würde auf diese Weise eine Art Wasser-Barometer bilden.

Wenn eine Saugpumpe erst in Gang gesetzt wird, so ist der Pumpenstiefel und die Saugröhre noch mit Luft gefüllt. Die ersten Kolbenzüge bringen noch keinen Ausfluss des Wassers durch die Röhre E zuwege, aber sie haben den Zweck, die Luft aus dem Innern der Pumpe wegzuschaffen und durch Wasser zu ersetzen. Wenn der Kolben bei dem ersten Kolbenzuge niedergeht, so wird die Luft unter ihm im Stiefel zusammengedrückt; und da sie durch das Ventil D, welches geschlossen ist, nicht entweichen kann, so öffnet sie die Kolbenventile und gelangt so in den oberen Theil des Stiefels. Wenn dann der Kolben wieder in die Höhe geht, so schliessen sich seine Ventile, die Luft im Saugrohr öffnet das Ventil D und verbreitet sich, indem sie sich ausdehnt, in den unteren Theil des Stiefels; zu gleicher Zeit aber vermindert sich die Spannkraft dieser Luft, und daraus folgt, dass sich das Wasser in der Röhre C bis auf eine gewisse Höhe erhebt. Wenn darauf der Kolben von Neuem abwärts geht, so durchdringt die Luft, welche soeben aus der Röhre C in den Pumpenstiefel überging, den Kolben und gelangt dadurch in's Freie; bei einem neuen Aufzug des Kolbens geht folglich eine neue Quantität Luft aus der Saugröhre in den Stiefel über, und das Wasser steigt in der Röhre C noch höher. Nach einigen Kolbengängen erhebt sich endlich das Wasser bis in das Innere des Stiefels; durch die abwärts gehende Bewegung des Kolbens wird alsdann die letzte Portion Luft, welche noch unter ihm stand, hinausgeschafft und die Pumpe beginnt nun Wasser zu liefern.

Wenn die Pumpe einmal auf die Weise, wie wir soeben beschrieben haben, angesaugt ist, so bleibt sie mit Wasser gefüllt, selbst wenn man ihre Thätigkeit unterbricht; wenn man sie folglich auf's Neue in Gang setzt, so liefert sie schon beim ersten Kolbenhub Wasser. Wenn indessen die Pumpe etwas lang in Ruhe bleibt, so wird sie gewöhnlich leer gefunden. Dies rührt davon her, dass die Drückungen in den verschiedenen Punkten der Wassersäule, welche unter dem Kolben aufgezogen gehalten wird, geringer sind als der Druck der atmosphärischen Luft, der auf der ganzen äusseren Oberfläche der Pumpe stattfindet; daraus folgt, dass die Luft durch alle, auch die feinsten Spalten und Ritzen, die sie findet, in's Innere der Pumpe zu dringen

sucht; namentlich findet sie zwischen dem Umfang des Kolbens und der inneren Fläche des Stiefels ihren Weg. In dem Maasse aber als die Luft in die Pumpe eindringt, senkt sich das Wasser in derselben und am Ende einer gewissen längeren oder kürzeren Zeit, je nachdem die Pumpe gut oder weniger gut gemacht ist, nimmt das Wasser in der Saugröhre dieselbe Höhe wieder ein wie in dem Reservoir, in welches letztere taucht.

Wir haben oben gesagt, dass der Abstand der unteren Fläche des Kolbens von der Oberfläche des Wassers im unteren Reservoir niemals grösser als die Höhe einer Wassersäule werden darf, welche dem Drucke der atmosphärischen Luft das Gleichgewicht zu halten vermag. Wenn man die Wirkungsweise des Kolbens, indem er die Pumpe ansaugt, aufmerksam verfolgt, und wenn man die Unvollkommenheiten, welche eine Pumpe immer darbietet, in Rechnung zieht, so sieht man, dass die wirkliche Höhe, auf welche das Wasser heraufgesaugt wird, beträchtlich hinter jener oben angegebenen äussersten Grenze zurückbleibt. Die Erfahrung hat gezeigt, dass man der Saugröhre keine grössere Länge als höchstens 8^m geben darf.

§. 408. Bei der Druckpumpe (Fig. 530) erhält ein Kolben A eine hin- und hergehende Bewegung in einem Stiefel, welcher selbst in das Reservoir, wo sich das zu hebende Wasser befindet, eintaucht. Eine Oeffnung B, welche unten an diesem Stiefel angebracht ist, ist mit einem Ventil versehen, das sich von unten nach oben öffnet: durch diese Oeffnung gelangt das Wasser aus dem Reservoir in den Stiefel. Eine zweite Oeffnung C verbindet den unteren Theil des Stiefels mit einer Röhre D, Steigröhre genannt, in welcher das Wasser gehoben werden soll; diese Oeffnung ist gleichfalls mit einem Ventil versehen, welches wohl die Flüssigkeit aus dem

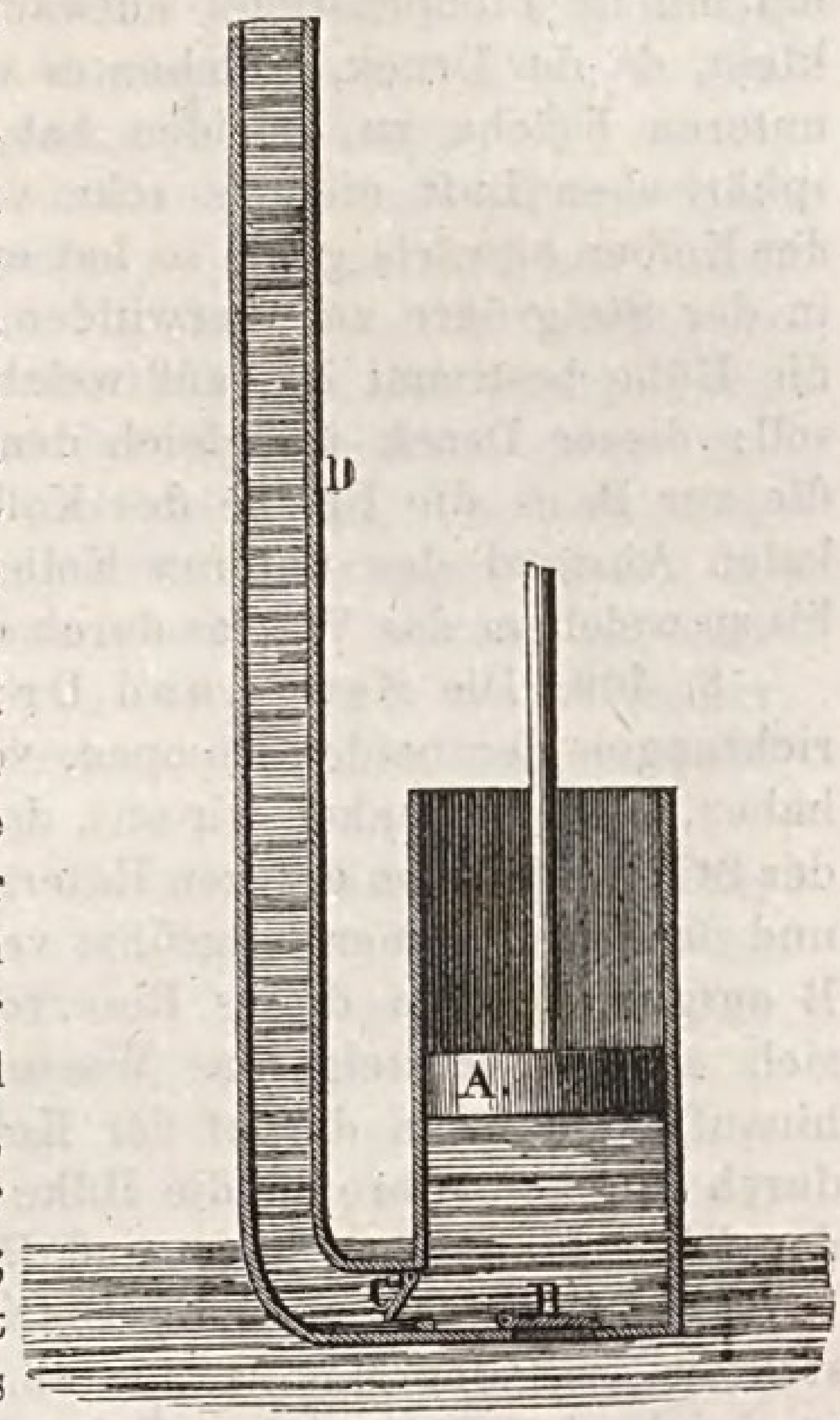


Fig. 530.

Stiefel in die Röhre D übergehen, aber nicht mehr aus dieser Röhre in den Stiefel zurückkehren lässt.

Wenn der Kolben A in die Höhe geht, so würde unter ihm ein luftleerer Raum entstehen; das Ventil C schliesst sich folglich, während sich das Ventil B öffnet, und der Stiefel füllt sich mit Wasser. Wenn hierauf der Kolben abwärts geht, so schliesst sich das Ventil B; das im Stiefel enthaltene Wasser wird gedrückt; es öffnet folglich das Ventil C und gelangt so in die Steigröhre D.

Wie gross auch die Höhe ist, bis zu welcher sich die Steigröhre einer Druckpumpe erhebt, so ist es doch immer möglich, das Wasser mittelst dieser Pumpe bis zu ihrem obersten Ende hinaufzutreiben, vorausgesetzt, dass auf den Kolben eine hinreichend grosse Kraft wirkt. Darin besteht der wesentliche Unterschied zwischen der Druck- und Saugpumpe; die letztere kann das Wasser in der Saugröhre nur auf eine Höhe heben, welche eine gewisse Grenze nicht überschreitet.

Die Kraft, welche auf den Kolben ausgeübt werden muss, um ihn im Pumpenstiefel aufwärts zu bewegen, ist immer nur klein, da der Druck, welchen er von Seite des Wassers auf seiner unteren Fläche zu erleiden hat, von dem Drucke der atmosphärischen Luft niemals sehr verschieden ist. Wenn dagegen der Kolben abwärts geht, so hat er den vollen Druck des Wassers in der Steigröhre zu überwinden, einen Druck also, der durch die Höhe bestimmt ist, auf welche das Wasser gehoben werden soll; dieser Druck ist gleich dem Gewichte einer Wassersäule, die zur Basis die Fläche des Kolbens und zur Höhe den vertikalen Abstand der unteren Kolbenfläche von dem Punkte hat, bis zu welchem das Wasser durch die Pumpe gehoben werden soll.

§. 409. Die **Saug- und Druckpumpe** vereinigt die Einrichtungen der beiden Pumpen, von denen wir eben gesprochen haben, in sich. Denken wir uns, dass in der Druckpumpe (Fig. 530) der Stiefel nicht im unteren Reservoir selbst, sondern höher stehe, und dass er mit einer Saugröhre versehen sei, die von der Oeffnung B ausgeht und in dieses Reservoir taucht. Wenn der Kolben sich erhebt, so steigt das Wasser durch Saugen in den Stiefel hinauf; und wenn darauf der Kolben abwärts geht, so wird es durch die Steigröhre in die Höhe gedrückt. Dies ist das Princip der Einrichtung der Saug- und Druckpumpen.

Häufig wendet man die Einrichtung, die in Fig. 529 dargestellt ist, mit der Modification an, dass das Wasser, anstatt dass es durch eine Seitenröhre E, welche an dem Pumpenstiefel be-

festigt ist, ausfliessen kann, in einer Steigröhre in die Höhe gehoben wird. Wenn der Kolben abwärts geht, so geht das Wasser, welches sich unter ihm befindet, durch ihn hindurch und gelangt so über ihn. Wenn er sich dann wieder erhebt, so wird nicht allein neues Wasser aus dem Reservoir in den Stiefel heraufgesaugt, sondern es wird auch das über dem Kolben befindliche Wasser in der Steigröhre in die Höhe gehoben. Die Pumpen dieser Art nennt man manchmal Saug- und Hubpumpen oder auch einfach Hubpumpen, weil in ihnen der Kolben das über ihm stehende Wasser in die Höhe hebt. In Wahrheit sind sie jedoch nichts weiter als Saug- und Druckpumpen, bei denen eben der Kolben das Wasser beim Aufwärtsgehen, anstatt bei seinem Niedergang, in die Höhe drückt.

Wenn man eine Pumpe anlegt, die dazu bestimmt ist, das Wasser eines Brunnens für den häuslichen Gebrauch zu liefern, so bringt man den Stiefel gewöhnlich oben an der Mündung des Brunnenschachtes an und hebt also das Wasser allein durch Saugen. Dies setzt aber voraus, dass die Tiefe des Brunnens 8^m nicht überschreitet (§. 407). Wenn diese Tiefe grösser ist, so muss man den Stiefel in den Brunnenschacht selbst stellen und folglich eine Saug- und Druckpumpe anwenden. In diesem Fall kann man den Stiefel in grössere oder geringere Höhe über den Wasserspiegel im Brunnen stellen, vorausgesetzt nur, dass diese Höhe 8^m nicht überschreitet. In der Wahl der Stelle, an welche man den Stiefel bringen will, lässt man sich einzig durch Gründe betreffend Ersparungen in der Construktion, sowie Bequemlichkeit der Aufstellung und Zugänglichkeit behufs Reparatur bestimmen; was die Bewegungsarbeit anbelangt, welche an der Pumpe angewandt werden muss, um das Wasser auf eine bestimmte Höhe zu heben, so weiss man, dass sie in keiner Weise von dem Orte abhängt, welchen man dem Pumpenstiefel in dem Brunnenschacht anweist (§. 394).

§. 410. Die Figur 531 zeigt die Einrichtung, welche für Pumpen, die für den häuslichen Gebrauch bestimmt sind, die gebräuchlichste ist. Der Hebel A B C dreht sich um eine Achse B. Indem man das Ende A hin- und herbewegt, gibt man dem Punkte C eine auf- und abgehende Bewegung. Eine Stange C D ist einestheils an dem Ende C des Hebels, andererseits in dem Punkte D der Stange des Kolbens E befestigt, sodass die hin- und hergehende Bewegung des Punktes C auf den Kolben übertragen wird, welcher sich auf diese Weise in dem Stiefel abwechselnd hebt und senkt. Wenn der Kolben E in die Höhe geht, so

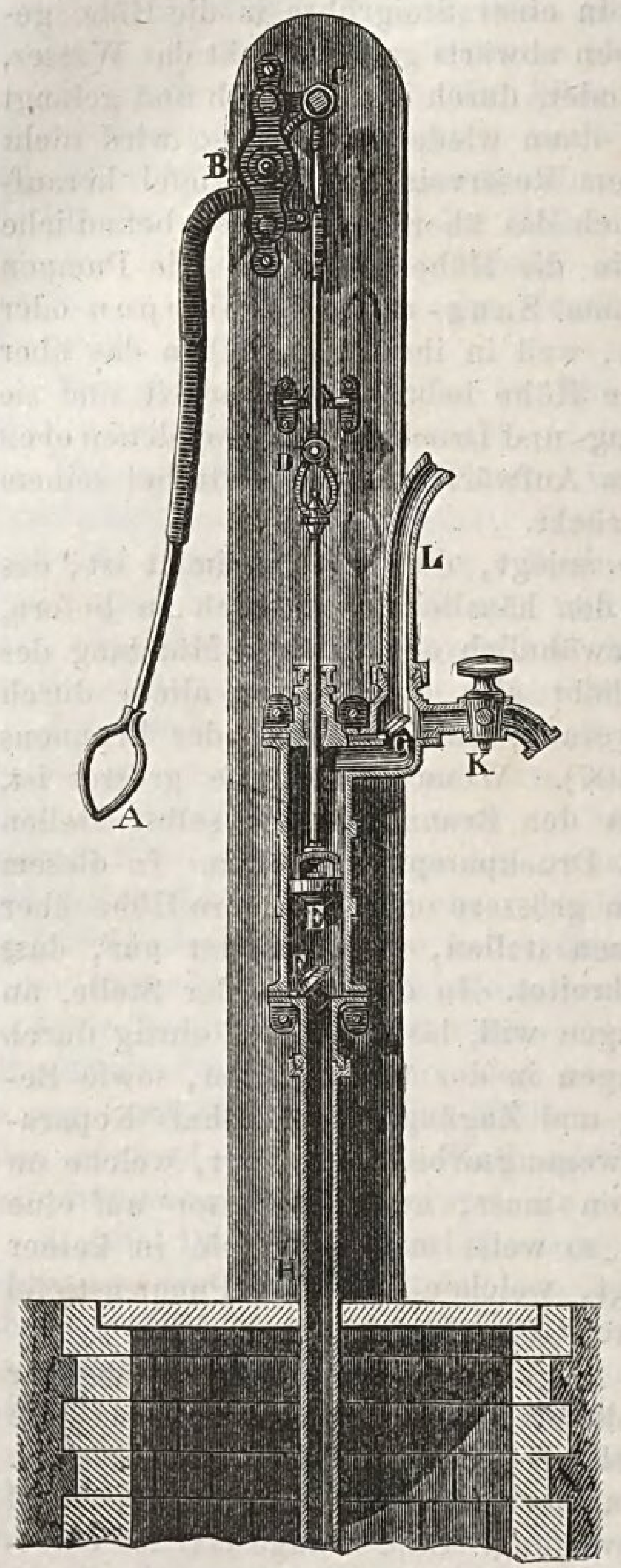


Fig. 531.

öffnen sich die beiden Ventile F und G; es wird einerseits das Wasser des Brunnens, über welchem die Pumpe angebracht ist, durch die Röhre H herauf und in den Stiefel gesaugt; andererseits wird das Wasser, welches bereits über dem Kolben steht, durch die Röhre L bis zu dem Punkte, wo sich diese Röhre endigt, in die Höhe gehoben. Wenn der Kolben abwärts geht, so schliessen sich die Ventile F und G, während das des Kolbens sich öffnet und das Wasser, welches sich im Stiefel unter dem Kolben befindet, dringt durch die Oeffnungen des letzteren hindurch und stellt sich über denselben. Man sieht daraus, dass man, um das Wasser in die Höhe zu fördern, auf den Hebel A B C nur dann eine Kraft auszuüben hat, wenn der Kolben in die Höhe gehen und sich folglich das Ende A des Hebels einwärts bewegen soll. Diese Kraft muss im Stande sein, folgende Widerstände zu überwinden: 1) das Gewicht einer Wassersäule, welche die Kolbenfläche zur Basis und den vertikalen Abstand des oberen Endes der Steigröhre L vom Spiegel des Wassers im Brunnen zur Höhe hat; dieser Widerstand greift im Punkte C des Hebels A B C an; 2) die passiven Widerstände, welche durch die Bewegung der festen Theile der Pumpe sowohl, wie durch die Bewegung des

Wassers hervorgerufen werden. Um die abwärts gehende Bewegung des Kolbens hervorzubringen, hat man nur passive Widerstände, die übrigens meist von geringem Belang sind, zu überwinden.

Gewöhnlich ist in der Nähe des oberen Theils des Pumpenstiefels eine kleine Seitenröhre, die mit einem Hahne K versehen ist, angebracht. Wenn man diesen Hahn K öffnet, so fliesst das Wasser durch jene Seitenröhre aus, ohne sich in die Steigröhre L zu erheben. Die Pumpe wirkt dann wie eine einfache Saugpumpe.

§. 411. Bei den verschiedenen Arten von Pumpen, die wir bisher beschrieben haben, ist die Bewegung des Wassers in der Saugröhre sowohl, wie in der Steigröhre intermittirend. Das Wasser steigt in jeder dieser Röhren nur dann aufwärts, wenn sich der Kolben in dem einen Sinne bewegt; es bleibt bei der entgegengesetzten Bewegung des Kolbens stehen, um seine aufsteigende Bewegung erst wieder aufzunehmen, wenn der Kolben anfängt, sich in dem ersteren Sinne zu bewegen. So bewegt sich bei den Druckpumpen (Fig. 530) das Wasser in der Steigröhre nur dann, wenn der Kolben abwärts geht; es bleibt stehen, wenn derselbe steigt. Ebenso bewegt sich in der in Fig. 531 abgebildeten Pumpe das Wasser in der Steigröhre sowohl, wie in der Saugröhre nur dann, wenn der Kolben in die Höhe geht; während seines Niederganges bleibt es ruhig in diesen Röhren stehen. Diese intermittirende Bewegung des Wassers bringt aber Arbeitsverluste hervor, welche aus folgenden Ursachen entspringen: 1) Das Wasser muss jedesmal, nachdem es sich in Ruhe befunden hatte, plötzlich in Bewegung gesetzt werden, was einem Stosse gleich zu achten ist. 2) Die Geschwindigkeit, welche das Wasser in den Röhren besitzt, wird bei jedem Kolbenzug vernichtet, ohne irgend eine nützliche Wirkung hervorzubringen; und es muss jedesmal, wenn das Wasser wieder in Bewegung gesetzt werden soll, eine gewisse Quantität von Arbeit dazu angewandt werden, um ihm diese Geschwindigkeit wieder zu geben.

Um diese intermittirende Bewegung des Wassers in der Saug- und Steigröhre zu vermeiden, hat man die doppeltwirkende Pumpe erdacht, in welcher das Wasser zu gleicher Zeit gesaugt und in die Höhe gedrückt wird, sowohl wenn der Kolben abwärts als wenn er aufwärts geht. Ein massiver Kolben A (Fig. 532) bewegt sich in einem Pumpenstiefel, der auf beiden Seiten geschlossen ist. Vier Oeffnungen B, C, B', C', von denen zwei oben, zwei unten in dem Pumpenstiefel angebracht sind, setzen denselben einerseits mit einer Saugröhre D, andererseits mit einer Steigröhre E in Verbindung; sämmtliche vier Oeffnungen sind mit

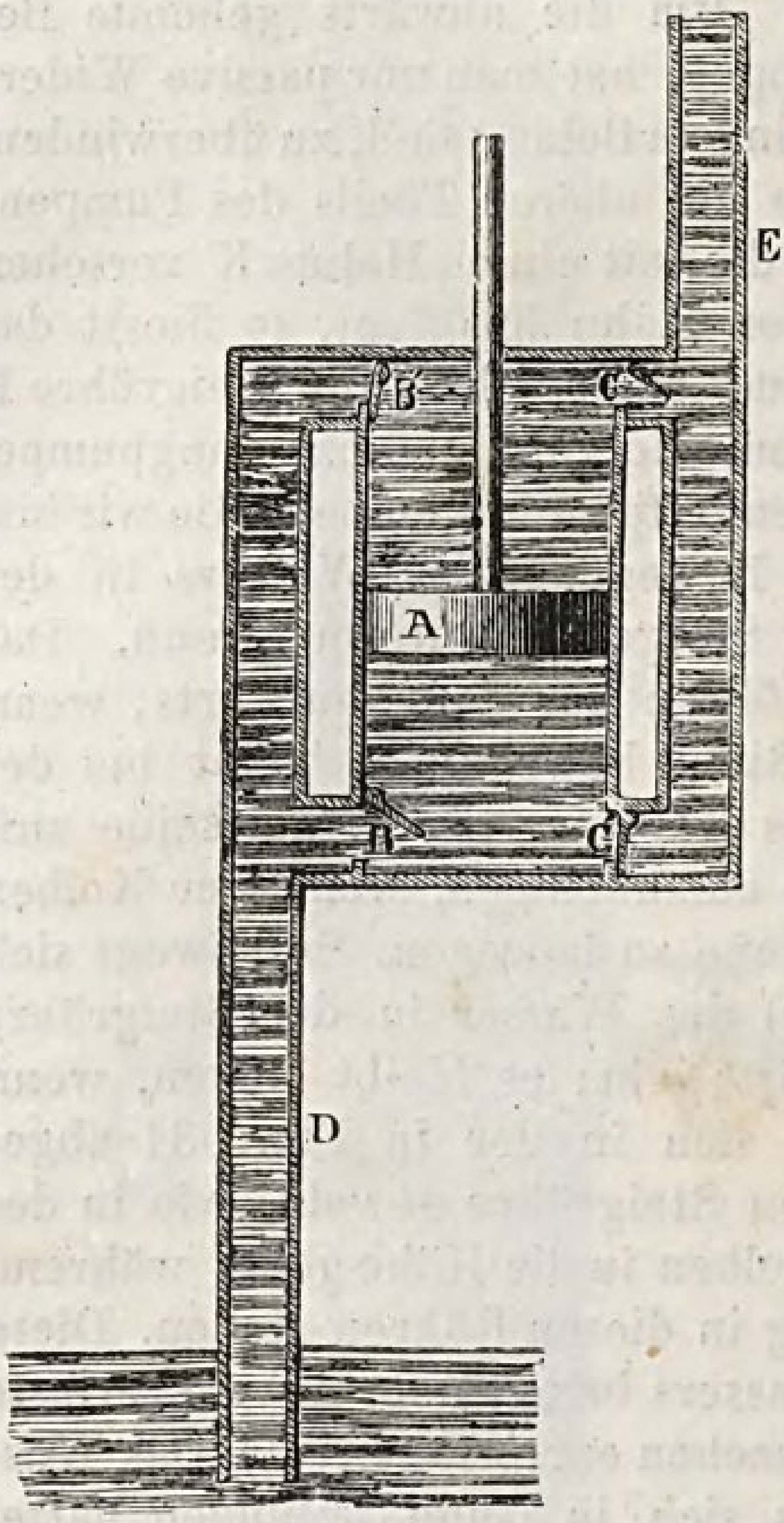


Fig. 532.

Ventilen versehen, die sich im Sinne der Bewegung, welche das Wasser annehmen muss, um entweder aus der Saugröhre in den Stiefel, oder aus dem Stiefel in die Steigröhre überzugehen, öffnen. Wenn der Kolben A in die Höhe geht, so sind die Ventile B′ und C′ geschlossen, während die B und C geöffnet sind; das Wasser steigt aus der Röhre D in den unteren Theil des Stiefels, und dasjenige, welches sich über dem Kolben befindet, wird in der Steigröhre E in die Höhe geschoben. Wenn hierauf der Kolben abwärts geht, so schliessen sich die Ventile B und C, während sich die anderen B′ und C′ öffnen; das Wasser der Saugröhre dringt durch die Oeffnung B′ in den oberen Theil des Stiefels, während dasjenige, welches vorher unter den Kolben gelangt ist, durch die Oeffnung C′ aus dem Stiefel hinaus und in der Steigröhre E in die Höhe gedrückt wird. Man sieht daraus, dass das Wasser sowohl in der Saug- wie in der Steigröhre immer in Bewegung ist.

Eine doppeltwirkende Pumpe, so eingerichtet, wie wir sie soeben beschrieben haben, liefert bei jedem Kolbenzug zweimal so viel Wasser als eine einfach wirkende Pumpe von gleichen Dimensionen. Aber darin liegt an und für sich kein Vortheil der doppeltwirkenden Pumpe; denn wenn sie einerseits eine doppelt so grosse Nutzarbeit als die anderen Pumpen leistet, so erfordert sie andererseits auch eine doppelt so grosse Bewegungsarbeit; aus diesem Gesichtspunkt betrachtet, bietet also die doppeltwirkende Pumpe keinen Vortheil vor einer einfachwirkenden, deren Stiefel einen doppelt so grossen Inhalt hat. Der Vortheil der doppeltwirkenden Pumpe besteht einzig in der Stetigkeit der Bewegung des Wassers in der Saug- und Steigröhre.

Man erreicht diesen Vortheil übrigens auch dadurch, dass

man zwei einfachwirkende Pumpen, welche mit einer und der nämlichen Saugröhre sowohl, als auch mit einer und derselben Steigröhre in Verbindung stehen, und deren Kolben sich immer im entgegengesetzten Sinne bewegen, mit einander kuppelt. Wenn die eine dieser Pumpen durch Saugen wirkt, so wirkt die andere durch Druck, und umgekehrt. Oft vereinigt man sogar, um eine noch grössere Regelmässigkeit der Bewegung des Wassers in den Röhren zu erzielen, drei und selbst vier einfachwirkende Pumpen mit einander, deren Bewegungen so in einander greifen, dass die Wassermenge, welche in jedem Augenblick gesaugt und in die Höhe gedrückt wird, nahezu immer constant bleibt.

§. 412. **Die Feuerspritze.** — Um das zum Löschen bei Feuersbrünsten nöthige Wasser zu liefern, bedient man sich der Druckpumpe. Die Steigröhre derselben ist meistens sehr leicht biegsam, um nach Belieben nach irgend einem Ort des Feuers gerichtet werden zu können, auch während die Pumpe in Thätigkeit ist. Die vertikale Höhe, bis zu welcher das Wasser in dieser Röhre gehoben werden soll, ist sehr verschieden; sie ist häufig sogar Null, wenn nämlich die Ausmündung der Röhre in gleicher Höhe mit dem Kolben der Pumpe gelegen ist. Aber der Zweck, den man durch Anwendung dieser Pumpe zu erreichen sucht, besteht nicht sowohl darin, das Wasser blos bis an das Ende der Steigröhre zu heben, sondern es soll noch mit bedeutender Geschwindigkeit aus der Mündung dieser Röhre ausfliessen; man bringt auf diese Weise einen Strahl von grosser Sprungweite hervor, welchen man auf die Stelle richten kann, wo man dem Feuer Einhalt thun will. Wir wollen nun sehen, welche Einrichtung man gewählt hat, um diesen Zweck zu erreichen.

Es ist von grosser Wichtigkeit, dass der Strahl, welcher aus der Steigröhre hervorspringt, eine gleichmässige Geschwindigkeit besitzt, die sich von einem Augenblick zum anderen kaum merklich ändert. Zu diesem Behufe bringt man zwei Druckpumpen neben einander an, deren Kolben *a*, *a* (Fig. 533) sich immer in entgegengesetzter Richtung bewegen und die im Verein eine doppelt wirkende Pumpe ersetzen (§. 411). Wenn einer dieser Kolben in die Höhe geht, so öffnet sich das unter ihm befindliche Ventil *b* und das Wasser tritt in den Stiefel; beim darauf folgenden Niedergang des Kolbens schliesst sich das Ventil *b* wieder, dagegen öffnet sich das betreffende Ventil *c* und das Wasser wird durch dasselbe hindurch in einen kleinen Behälter, der in der Mitte der Maschine angebracht ist und in welchen die Steigröhre *d* mündet, geschafft.

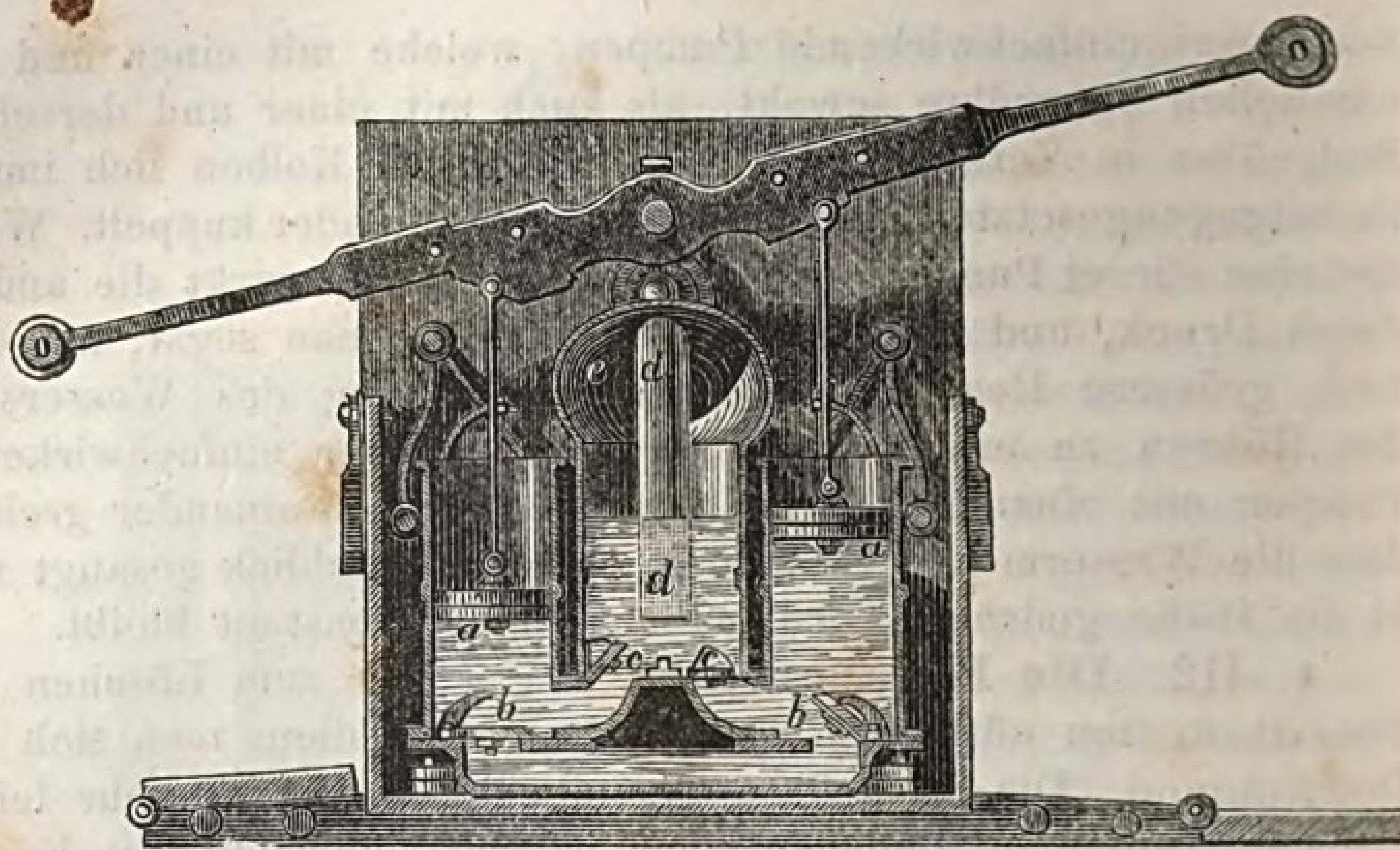


Fig. 533.

Ungeachtet der gleichzeitigen Anwendung zweier Druckpumpen, die mit einer und derselben Steigröhre in Verbindung stehen, würde die Geschwindigkeit des Wassers doch noch lange nicht so regelmässig sein als es gewünscht werden muss; die Bewegung des Wassers würde sich in sehr merklichem Grade jedesmal dann verzögern, wenn die beiden Kolben, am Ende ihres Laufes angekommen, die Richtung ihrer Bewegung ändern. Man musste desshalb noch zu einem anderen Mittel seine Zuflucht nehmen; dieses Mittel, die Geschwindigkeit des Wassers zu reguliren, besteht in der Anwendung des sog. Windkessels *e*, der sich über dem Raum befindet, in welchen sich das Wasser, welches aus den Pumpenstiefeln kommt, ergiesst. Die Luft, welche in diesem Reservoir enthalten ist, ist vollständig eingeschlossen; sie setzt sich folglich mit dem Drucke des Wassers, über welchem es steht, in's Gleichgewicht und ihre Spannkraft wird um so grösser, einen je stärkeren Druck die Bewegung des Wassers in der Steigröhre am Eingange dieser Röhre *d* erfordert. Wenn in irgend einem Augenblick das Wasser in grosser Menge durch eines der Ventile *c*, *c* strömt, so braucht es nicht unmittelbar in die Röhre *d* einzudringen; es sammelt sich in dem Windkessel, in welchen diese Röhre taucht, an und drückt die Luft über sich zusammen; wenn hierauf wieder weniger Wasser durch die Ventile *c*, *c* einströmt, so dehnt sich diese Luft wieder aus und drückt, indem sie auf das Wasser zurückwirkt, dasselbe allmählich in die Steigröhre. In Folge dieser Einrichtung machen sich die Unregelmässigkeiten in den Wassermengen, die in jedem

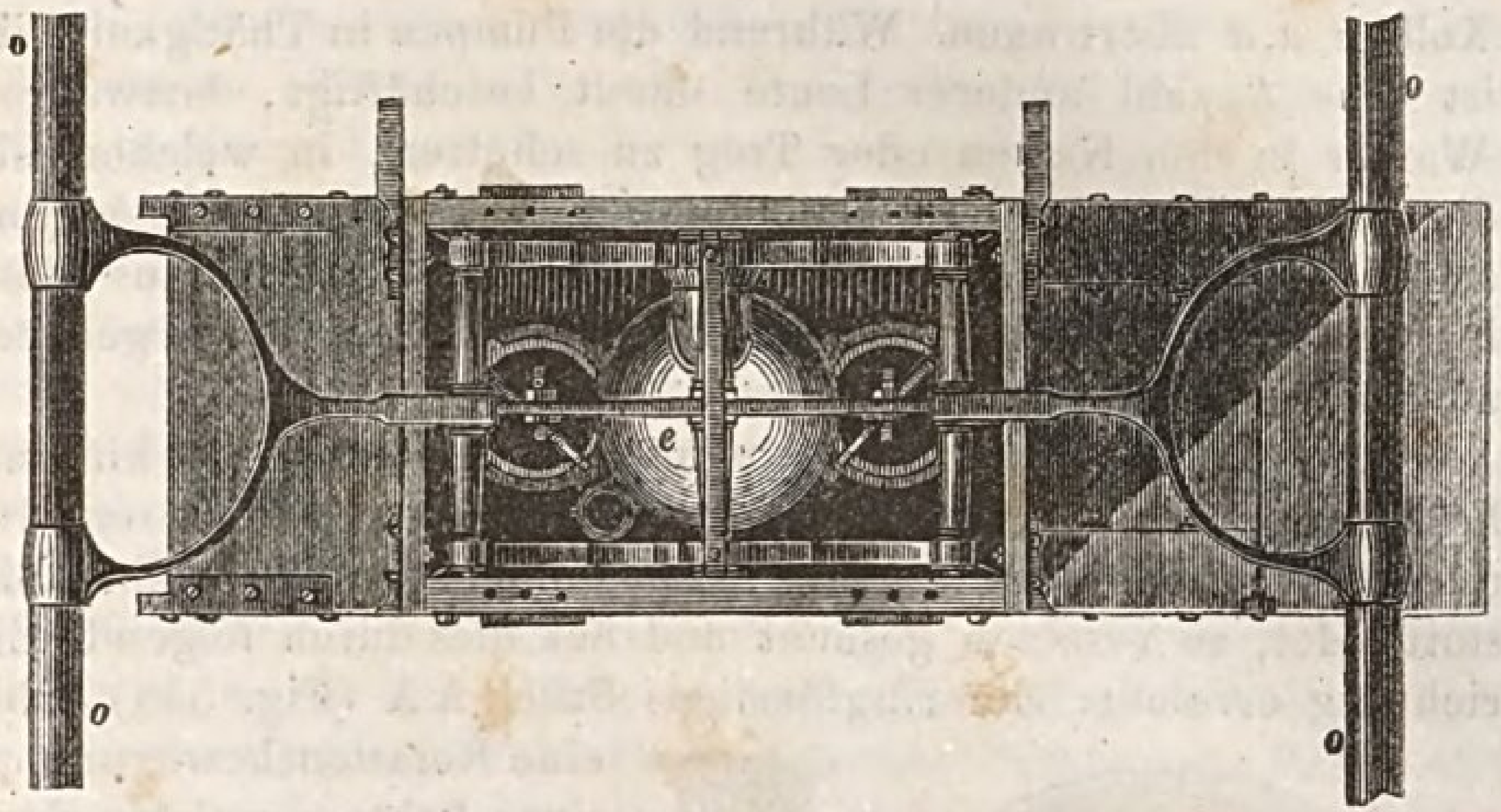


Fig. 534.

Augenblick durch die Ventile *c*, *c* gedrückt werden, hauptsächlich in dem Reservoir, in welches sich jene Ventile öffnen, geltend und zeigen sich dort durch die Schwankungen der Oberfläche des Wassers, welche abwechselnd steigt und fällt; dagegen haben diese Unregelmässigkeiten nur kaum merkbare Aenderungen in der Geschwindigkeit, mit welcher das Wasser aus dem Ende der Steigröhre hervorspringt, zur Folge.

Damit das Wasser nicht der ganzen Länge der Steigröhre entlang die Geschwindigkeit besitzen muss, mit welcher es aus dem Ende derselben hervorspringen soll, wodurch eine sehr bedeutende Reibung hervorgerufen werden würde, so muss man dafür sorgen, den Querschnitt der Röhre bedeutend grösser als den der Ausflussöffnung an ihrem Ende zu machen. Auf diese Art bewegt sich dann das Wasser in der Röhre selbst nur langsam und nimmt erst in dem Moment, wo es aus derselben austritt, eine grosse Geschwindigkeit an.

Um die Feuerspritze in Thätigkeit zu setzen, wirkt man auf die beiden Enden eines grossen Hebels, welcher sich um eine horizontale Achse drehen kann, die über dem Windkessel *e* (Fig. 533 und 534) angebracht ist. Dieser Hebel trägt an jedem Ende eine lange hölzerne Stange *o*, die als Handhabe dient. Diese Handhaben werden von mehreren Menschen zugleich ergriffen, die sie abwechselnd auf- und niederdrücken. Die dadurch hervorgebrachte hin- und hergehende Bewegung wird mittelst Eisenstäben, die einerseits an der Stange jedes der Kolben, andererseits an dem Hebel in zwei Punkten befestigt sind, die zu beiden Seiten der Achse desselben liegen, auf die beiden

Kolben *a*, *a* übertragen. Während die Pumpen in Thätigkeit sind, ist eine Anzahl anderer Leute damit beschäftigt, fortwährend Wasser in den Kasten oder Trog zu schütten, in welchem sich die beiden Pumpenstiefel befinden. Aus diesem Kasten gelangt das Wasser durch die Ventile *b*, *b* in die Stiefel, um aus diesen in den Windkessel und von da in die Steigröhre gedrückt zu werden.

§. 413. **Die Rotationspumpe.** — Man hat die hin- und hergehende Bewegung, welche der Kolben einer Pumpe erhalten muss, durch eine Rotationsbewegung, die immer in demselben Sinn stattfindet, zu ersetzen gesucht und hat dies durch folgende Einrichtung erreicht: Ein ringförmiges Stück AA (Fig. 535) erhält eine Rotationsbewegung um eine Achse, welche durch seinen Mittelpunkt hindurch geht; es dreht sich in einem gleichfalls ringförmigen Raume BB. Der Ring AA besitzt vier Einschnitte, durch welche ebenso viele Stücke C, C hindurchgehen, die dazu bestimmt sind, den Raum BB in vier Abtheilungen zu theilen, welche in keinerlei Verbindung mit einander stehen.

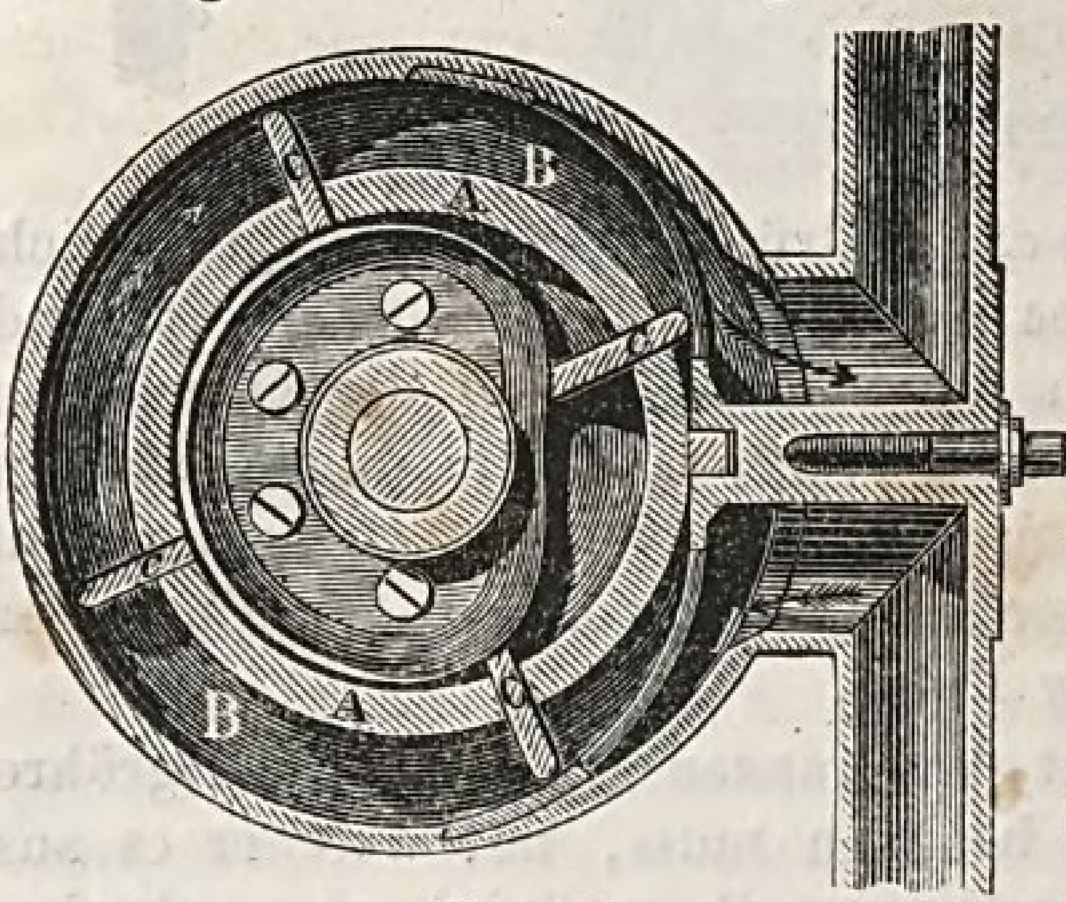


Fig. 535.

Die äussere sowohl, als die innere Begrenzung des ringförmigen Raumes BB, in welchem sich der Ring AA mit den Stücken C, C bewegt, ist nicht kreisförmig; diese beiden Begrenzungen, welche durchweg in gleichem Abstande von einander bleiben, nähern sich auf der rechten Seite dem Mittelpunkt des Ringes AA, sodass die innere Begrenzung in Berührung mit der Aussenfläche dieses Ringes tritt. In Folge dieser Form des Raumes BB werden die Stücke C, C genöthigt, sich in den Einschnitten des Ringes AA zu verschieben und sich auf diese Weise der Rotationsachse abwechselnd zu nähern und wieder davon zu entfernen. Daraus folgt, dass die vier Abtheilungen rings um den Ring AA herum, welche durch die Stücke C, C von einander getrennt werden, nicht immer denselben Rauminhalt behalten; sie vergrössern sich, wenn sich die Stücke C, C, welche sie begrenzen, vom Centrum der Bewegung entfernen; und sie werden im Gegentheil kleiner, wenn sich diese Stücke C, C dem Centrum nähern. In der äusseren Wand des Raumes BB sind zwei Oeffnungen angebracht,

welche, die eine einer Saugröhre, die andere einer Steigröhre entsprechen. Wenn während der Rotation des Ringes AA eine der Abtheilungen, welche ihn umgeben, sich vergrössert, so steht diese Abtheilung mit der Saugröhre durch die erste jener Oeffnungen in Verbindung; sie saugt folglich das in dieser Röhre enthaltene Wasser ein und ist auf diese Weise in dem Augenblick, wo sie ihren grössten Rauminhalt erreicht hat, vollständig mit Flüssigkeit gefüllt. Wenn sich hierauf der Rauminhalt dieser Abtheilung verringert, so steht sie durch die zweite jener Oeffnungen mit der Steigröhre in Verbindung; das Wasser wird folglich in dem Maasse, als sich diese Abtheilung verkleinert, genöthigt, in die Steigröhre einzudringen. Man sieht aus dieser Beschreibung, dass die in Rede stehende Pumpe eine Saug- und Druckpumpe ist, und dass sie, noch mehr, vollständig den Zweck einer doppelt wirkenden Pumpe erfüllt; die Bewegung, welche sie dem Wasser in der Saugröhre sowohl, wie in der Steigröhre gibt, ist offenbar continuirlich.

§. 414. **Bergwerkspumpen.** — Zur Förderung des Wassers aus den unterirdischen Gängen der Bergwerke bedient man sich am häufigsten der Pumpen, die man in einem Schachte aufstellt, der sich unten an der Stelle endigt, wo sich das zu hebende Wasser aus den verschiedenen Stollen sammelt. Schächte dieser Art haben oft eine grosse Tiefe; man ist desshalb genöthigt, den Pumpen, welche hier zur Anwendung kommen sollen, eine besondere Einrichtung zu geben.

Nach dem, was wir oben gesagt haben, könnte eine Druckpumpe das Wasser in einer Steigröhre, welche sich bis zur ganzen Höhe des Schachtes erstreckt, in die Höhe schaffen; aber dies würde voraussetzen, dass die Pumpe in ihrer Construction Bedingungen erfüllt, die nur äusserst schwer zu erhalten sind und denen man überhaupt erst seit einer kurzen Reihe von Jahren genügen kann. Damit der Kolben das Wasser in eine Steigröhre von grosser Höhe hinaufdrücken kann, muss er so dicht an den Wänden des Stiefels anschliessen, dass die Flüssigkeit selbst unter dem enormen Druck der zu hebenden Wassersäule nicht zwischendurch dringen kann. In Folge dieses Durchsickerns des Wassers könnte es kommen, dass trotz des Kolbens das Wasser in der Steigröhre nicht gehoben würde; aber selbst auch angenommen, dass die Pumpe Wasser liefert, so würde doch ein bedeutender Theil der Arbeit, die zur Bewegung der Pumpe erforderlich ist, verloren werden. Aus diesem Grunde erhebt man das Wasser nicht mit einemmal durch unten ange-

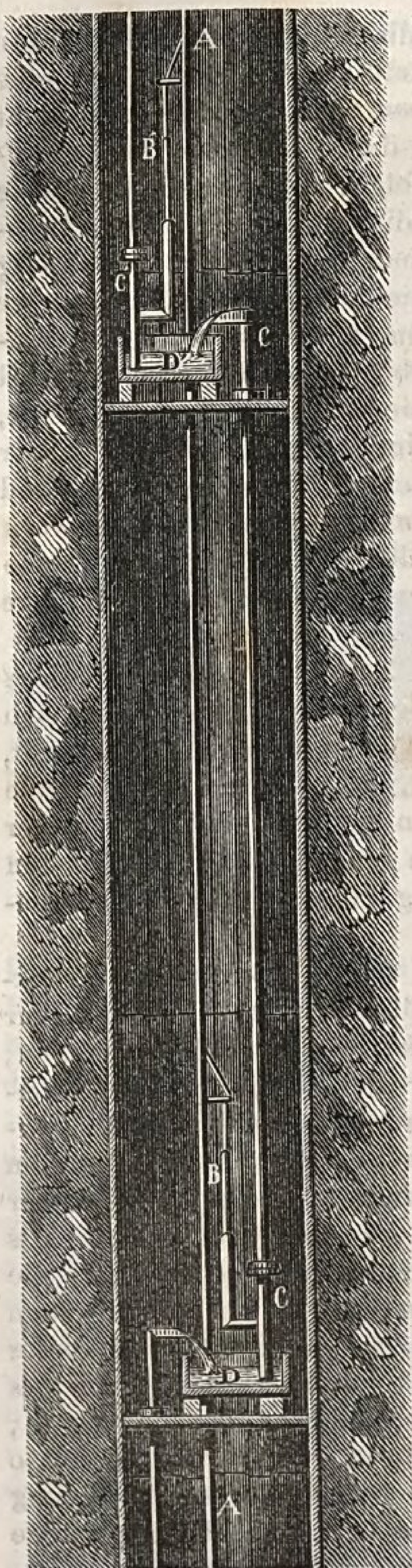


Fig. 536.

brachte Druckpumpen auf die ganze Höhe des Schachtes, sondern zieht es vor, folgende Einrichtung zu treffen.

Man theilt den Schacht seiner ganzen Höhe nach in mehrere über einander liegende Etagen und bringt in jeder derselben eine Pumpe an, die dazu bestimmt ist, das Wasser in die nächst höher gelegene zu heben. Ein Gestänge AA (Fig. 536), Kunstgestänge genannt, welches sich von oben nach unten durch den ganzen Schacht erstreckt, trägt von Entfernung zu Entfernung die Kolben B, B′ der verschiedenen Pumpen; es erhält durch eine Kraftmaschine, die an der Oberfläche der Erde in der Nähe der Schachtöffnung aufgestellt ist, eine hin- und hergehende Bewegung und setzt dadurch sämmtliche Pumpen in der ganzen Höhe des Schachtes zu gleicher Zeit in Thätigkeit. Indem der Kolben B auf- und abwärts geht, vermehrt und vermindert er abwechselnd den inneren Rauminhalt eines Pumpenstiefels, welcher durch ein horizontales Röhrenstück mit dem unteren Theil der Röhre C C communicirt. In dieser Röhre befinden sich zwei Ventile, das eine über, das andere unter der Einmündung des horizontalen Röhrenstücks in dieselbe; beide Ventile öffnen sich von unten nach oben. Wenn der Kolben B in die Höhe geht, so schliesst sich das obere Ventil, während sich das untere öffnet, und das Wasser des Troges D steigt durch Saugen in den Pumpenstiefel. Wenn hierauf der Kolben B wieder abwärts steigt, so schliesst sich das untere Ventil, dagegen öffnet sich das obere und das

Wasser wird in der Steigröhre CC in die Höhe gedrückt. Oben ausfliessend ergiesst sich dieses Wasser in einen Trog D′, aus welchem es mittelst des Kolbens B′ gesaugt und auf dieselbe Weise in einer Röhre C′ in die Höhe gedrückt wird. So wird das Wasser von Etage zu Etage gehoben, bis es ganz oben an der Mündung des Schachtes anlangt, wo es sich nach aussen ergiesst.

§. 415. **Taucherkolben.** — In neuerer Zeit wendet man bei den Druckpumpen fast allgemein die sog. Taucherkolben an, besonders dann, wenn ein grosser Druck auszuüben ist, wie z. B. bei den Speisepumpen der Hochdruckdampfkessel, bei Bergwerkspumpen etc.

Ein Metallkolben A (Fig. 537) hat die Form eines Cylinders, dessen Höhe bedeutend grösser als sein Durchmesser ist; dieser Kolben bewegt sich in einem Pumpenstiefel, dessen Wände er jedoch nicht berührt, sondern anstatt dessen, möglichst luft- und wasserdicht, durch eine Stopfbüchse geht, welche an dem oberen Theil des Stiefels angebracht ist. Durch zwei Klappen- oder andere Ventile B wird die Verbindung des Stiefels mit der Saugröhre abwechselnd hergestellt und wieder unterbrochen. Ein anderes Ventil C erfüllt denselben Zweck bezüglich der Verbindung des Stiefels mit der Steigröhre. Die auf- und abgehende Bewegung des Kolbens bringt eine abwechselnde Vermehrung und Verminderung des Rauminhalts des Stiefels hervor, ganz so, als wenn der Kolben selbst mit einer Liderung versehen wäre und sich an den Wänden des Stiefels reiben würde. Wenn sich der Kolben hebt, so saugt er das Wasser durch die Ventile B ein; und wenn er hierauf wieder niedergeht, so wird dieses Wasser

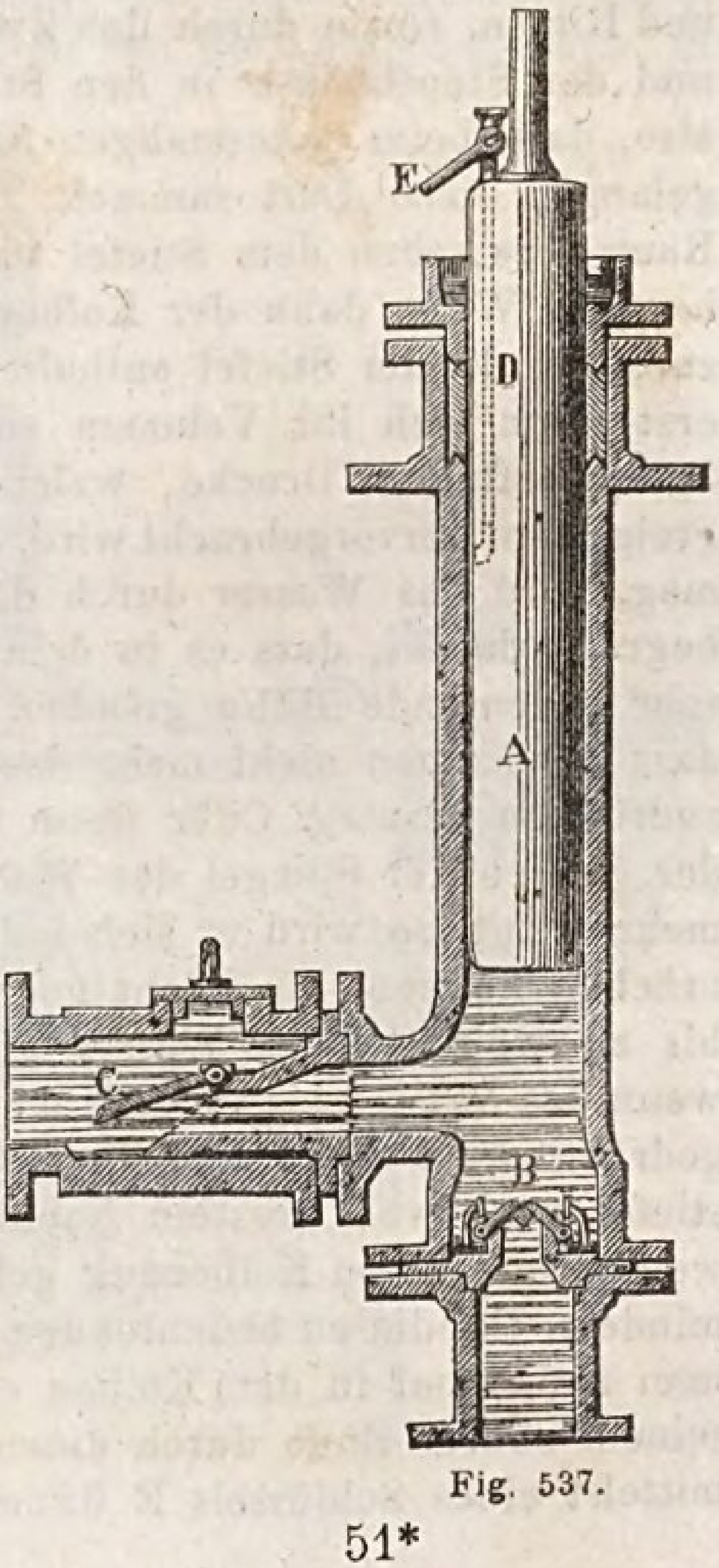


Fig. 537.

durch das Ventil C hinausgedrückt. Die Dichtung der Stopfbüchse, welche oben an dem Pumpenstiefel angebracht ist, kann leichter in gutem Zustande erhalten werden, als wenn die Liderung an dem Kolben selbst angebracht wäre.

Wenn man den Vorgang, welcher stattfindet, während die Pumpe in Thätigkeit ist, untersucht, so sieht man, dass der Druck im Pumpenstiefel zur Zeit, wo der Kolben in die Höhe geht, wo also gesaugt wird, kleiner als der Druck der atmosphärischen Luft ist, dass er aber im Gegentheil bedeutend grösser als dieser sein muss, wenn das Wasser die Steigröhre hinauf gedrückt wird. Im ersten Fall entweicht aus dem Wasser, das immer etwas Luft absorbirt enthält, ein Theil dieser Luft; ausserdem führt das Wasser auch stets kleine Luftmengen mit sich, die mechanisch mit in den Stiefel hineingerissen werden, und endlich kann die atmosphärische Luft auch durch etwa vorhandene feine Spalten und Ritzen, sowie durch den Zwischenraum zwischen dem Kolben nnd der Stopfbüchse in den Stiefelraum eindringen. Man sieht also, dass beim jedesmaligen Saugen etwas Luft in den Stiefel gelangt; diese Luft sammelt sich in dem engen ringförmigen Raume zwischen dem Stiefel und Kolben, sowie unter dem Kolben an. Wenn dann der Kolben abwärts geht, so wird dadurch zunächst die im Stiefel enthaltene Luft zusammengedrückt, und erst wenn sich ihr Volumen so sehr verringert hat, dass ihre Spannkraft dem Drucke, welcher durch die Wassersäule in der Steigröhre hervorgebracht wird, das Gleichgewicht zu halten vermag, wird das Wasser durch das Ventil C hinausgedrückt. Man begreift daraus, dass es in dem Falle, wo das Wasser auf eine sehr bedeutende Höhe gehoben werden soll, vorkommen kann, dass der Kolben nicht mehr das Wasser in die Steigröhre hineinzudrücken vermag. Oder wenn auch beim Beginn der Thätigkeit der Pumpe der Spiegel des Wassers in der Steigröhre mehr und mehr steigt, so wird er sich doch nicht über eine gewisse Grenze erheben können, die leicht noch tiefer liegen mag, als der Punkt, bis zu welchem das Wasser gehoben werden soll. Und selbst wenn das Wasser bis zu dem obersten Ende der Steigröhre hinaufgedrückt wird, so ist doch die Gegenwart der Luft in dem Pumpenstiefel noch von grossem Nachtheil, da sie die Wassermenge, welche bei jedem Kolbenzug gehoben wird, sehr bedeutend vermindert. Um diesen bedeutenden Nachtheilen auszuweichen, bringt man manchmal in dem Kolben einen kleinen Kanal D an, der an seinem oberen Ende durch einen Hahn geschlossen ist, den man mittelst eines Schlüssels E öffnen kann. Diesen Hahn öffnet man

von Zeit zu Zeit in dem Moment, wo der Kolben niedergeht, wodurch offenbar die Luft aus dem Stiefel durch den Kanal D ausgetrieben wird.

§. 416. **Die Centrifugalpumpe.** — In den Industrie-Ausstellungen in London (1851) und Paris (1855) sah man eine Maschine in Thätigkeit, die zum Heben des Wassers diente und mit dem Namen Centrifugalpumpe bezeichnet war. Diese Maschine, erfunden von dem Engländer *Appold*, gehört nicht zu den eigentlich so genannten Pumpen, deren allgemeinen Charakter wir in §. 404 festgesetzt haben. Ihre Einrichtung ist folgende.

Der Hauptbestandtheil ist eine Art Rad A A (Fig. 538), das auf einer horizontalen Welle befestigt ist, der man mittelst eines Riemens ohne Ende, welcher über die Rolle C geht, eine sehr schnelle Rotationsbewegung ertheilt. Die Figur 539 zeigt einen Durchschnitt dieses Rades, senkrecht auf die Achse desselben, in

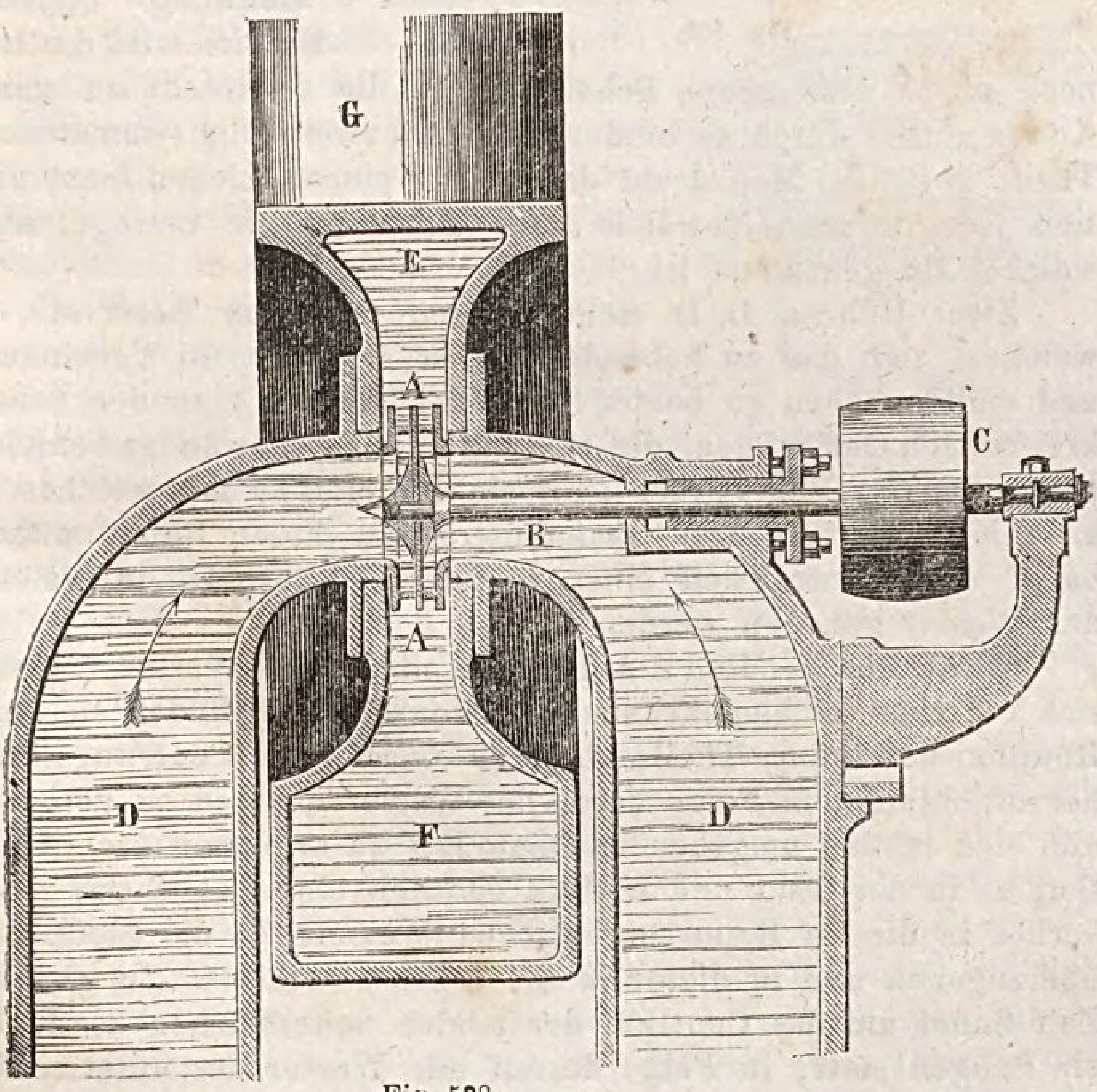


Fig. 538.

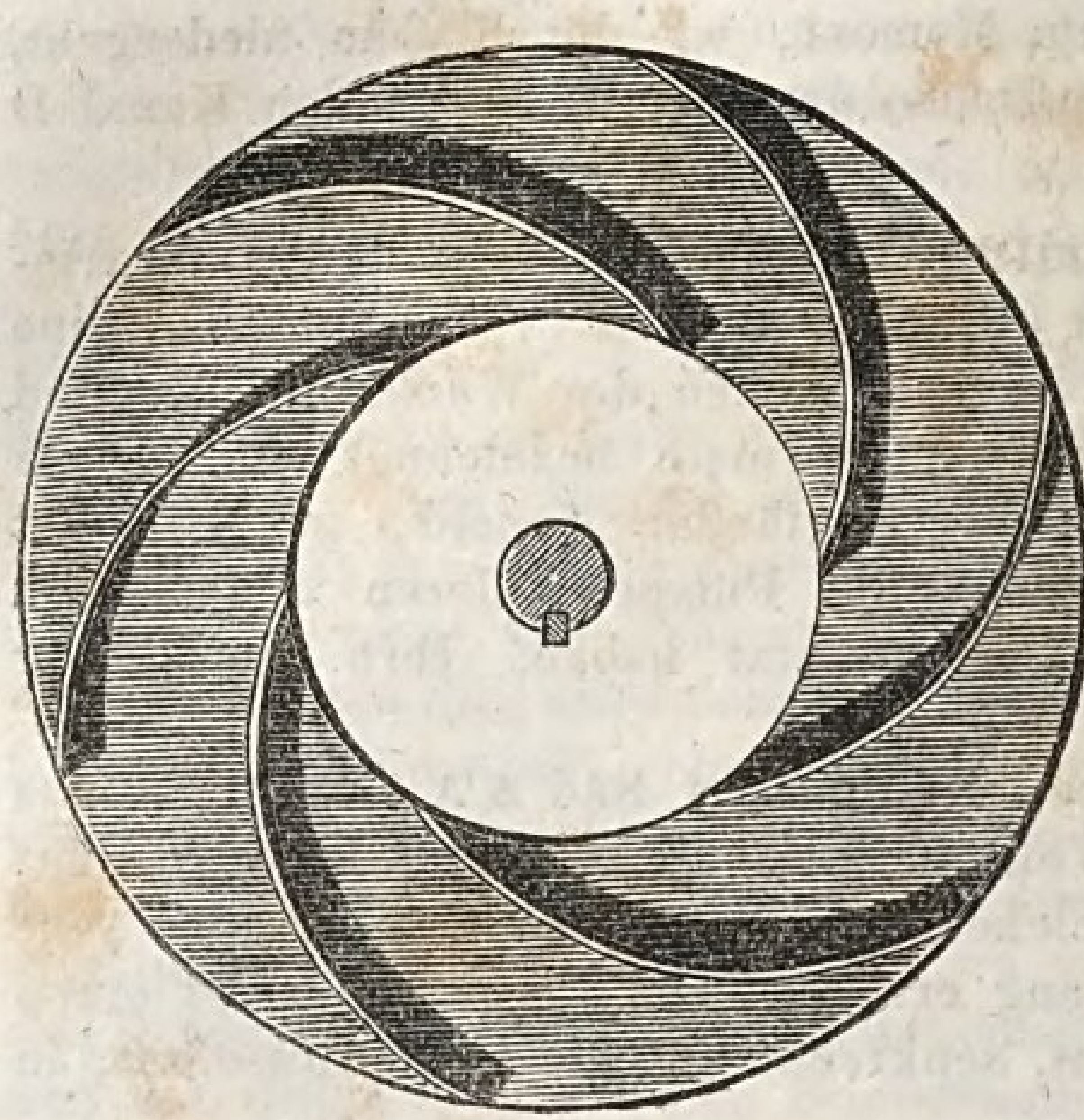


Fig. 539.

grösserem Maassstab. Es besteht im Wesentlichen aus sechs gekrümmten Scheidewänden, die sich parallel zur Achse von einer Seite des Rades zur andern erstrecken und um diese Achse regelmässig angeordnet sind. Jede der beiden Seiten des Rades wird durch eine Scheibe gebildet, die in ihrer Mitte eine breite, kreisrunde Oeffnung besitzt. Endlich wird das Rad noch durch eine ebene Scheidewand, die senkrecht zu seiner Achse mitten durch es hindurchgeht, in zwei völlig symmetrische Theile getheilt. Man dreht das Rad in einem solchen Sinn, dass sich jede der Scheidewände nach der Seite hin bewegt, nach welcher sie gekrümmt ist.

Zwei Röhren D, D stehen unten mit dem Reservoir, in welchem sich das zu hebende Wasser befindet, in Verbindung und endigen oben zu beiden Seiten des Rades A A an den beiden kreisrunden Oeffnungen, die sich in seinen Seitenwänden befinden. Rings um das Rad herum geht ein Raum E F, mit welchem es an seinem Umfang frei communicirt. In diesen Raum mündet bei F der untere Theil einer vertikalen Röhre G, in welcher das Wasser gehoben werden soll.

Wenn sich das Rad A A dreht, so nimmt das Wasser, welches sich zwischen seinen gekrümmten Seitenwänden befindet, an seiner Rotationsbewegung Theil; dadurch wird eine Centrifugalkraft hervorgebracht, in Folge deren das Wasser das Rad zu verlassen und sich in den umgebenden Raum E F zu ergiessen sucht. Dies thut es in der That und nöthigt dadurch einen Theil des schon vorher in diesem Raum enthaltenen Wassers in die Steigröhre überzugehen und in dieser in die Höhe zu steigen. Zu gleicher Zeit findet um das Centrum der beiden Seitenflächen des Rades ein Saugen statt, in Folge dessen das Wasser des unteren Reservoirs in den Röhren D, D in die Höhe steigt, um in das Rad

einzudringen und auf diese Weise fortwährend das wieder zu ersetzen, welches beständig an seinem Umfang in Folge der Centrifugalkraft ausgetrieben wird. Diese Maschine gibt besonders in den Fällen, wo die Höhe, auf welche das Wasser in der Röhre G gehoben werden soll, nicht sehr gross ist, recht gute Resultate.

§. **417. Wasserzoll.** — Um die Wassermenge, welche eine Pumpe oder eine nicht sehr bedeutende Quelle liefert, zu bestimmen, bedient man sich einer speciellen Einheit, welche den Namen Wasserzoll führt. Denken wir uns, man habe in der vertikalen, dünnen Wand eines Reservoirs eine kreisrunde Oeffnung von einem Zoll Durchmesser angebracht, und das Niveau des Wassers im Reservoir würde in einer Höhe von einer Linie über der obersten Stelle der Mündung erhalten (die Figur 540 stellt diese Anordnung in halber natürlicher Grösse dar), so nennt man die Wassermenge, welche durch diese Oeffnung fliesst, einen Wasserzoll. Solcher Oeffnungen sind eine gewisse Anzahl nebeneinander in der Wand des Reservoirs angebracht und können willkürlich geöffnet und geschlossen werden, letzteres gewöhnlich durch einfache Pfropfen. In das Reservoir ergiesst sich die zu messende Wassermenge, und wenn man so viele der in der Seitenwand desselben angebrachten Oeffnungen aufmacht, dass das Niveau constant eine Linie über dem obersten Rand der Oeffnungen erhalten bleibt, so ist klar, dass sich so viele Flüssigkeit durch die Oeffnungen aus dem Reservoir ergiesst, als in dasselbe geliefert wird. Je nachdem man nun eine, zwei, drei Oeffnungen dieser Art aufmachen musste, sagt man die Quelle oder Pumpe liefere einen, zwei, drei Wasserzoll.

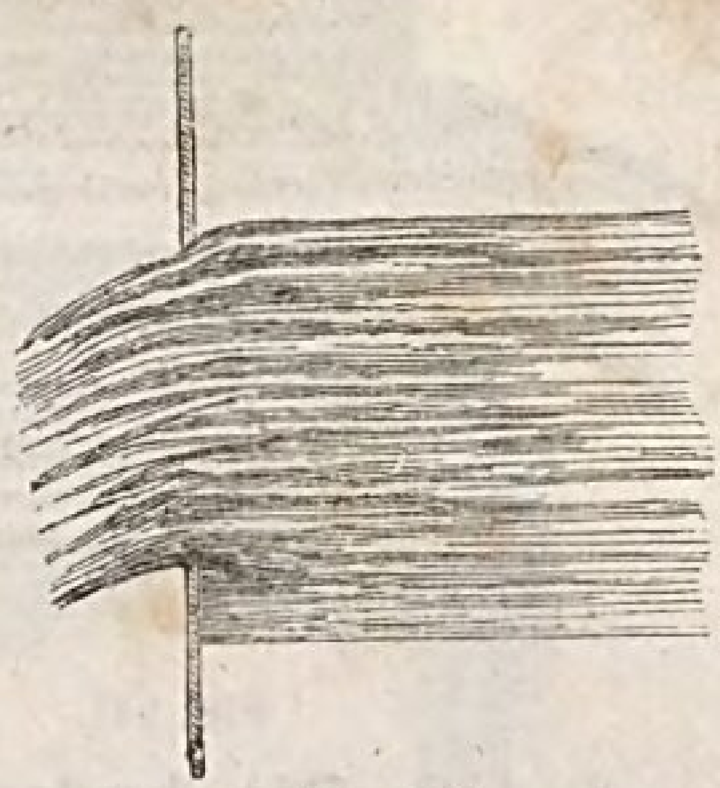


Fig. 540.

Der Wasserzoll stellt, wie man sieht, kein bestimmtes Wasservolumen dar. Er ist von der Zeit ganz unabhängig und gibt desshalb die von einer Pumpe gelieferte Wassermenge, ohne dass es nöthig wäre, die Zeit zu bezeichnen, während welcher die Pumpe in Thätigkeit war. Wenn man dagegen die von der Pumpe gelieferte Wassermenge in bestimmtem Volumen, in Cubikmetern oder in Litern angeben wollte, so müsste man allemal hinzusetzen, wie lange die Pumpe gewirkt hat. Der Versuch hat gezeigt, dass das Wasservolumen, welches sich in 24 Stunden

durch eine kreisrunde Oeffnung von einem Zoll (altes Pariser Maass) Durchmesser, angebracht in einer dünnen Wand, unter einem Drucke von einer Linie (über dem obersten Rand der Oeffnung) ergiesst, ungefähr 19,2 Cubikmeter (773 Cubikfuss bayer.) beträgt. Wenn man also sagt, dass eine Pumpe einen, zwei, drei Wasserzoll gebe, so bezeichnet das, dass sie in 24 Stunden einmal, zweimal, dreimal 19 cm,2 Wasser liefert. Nach Hagen gibt ein Wasserzoll (für das preussische Maass) in 24 Stunden 520 Cubikfuss.

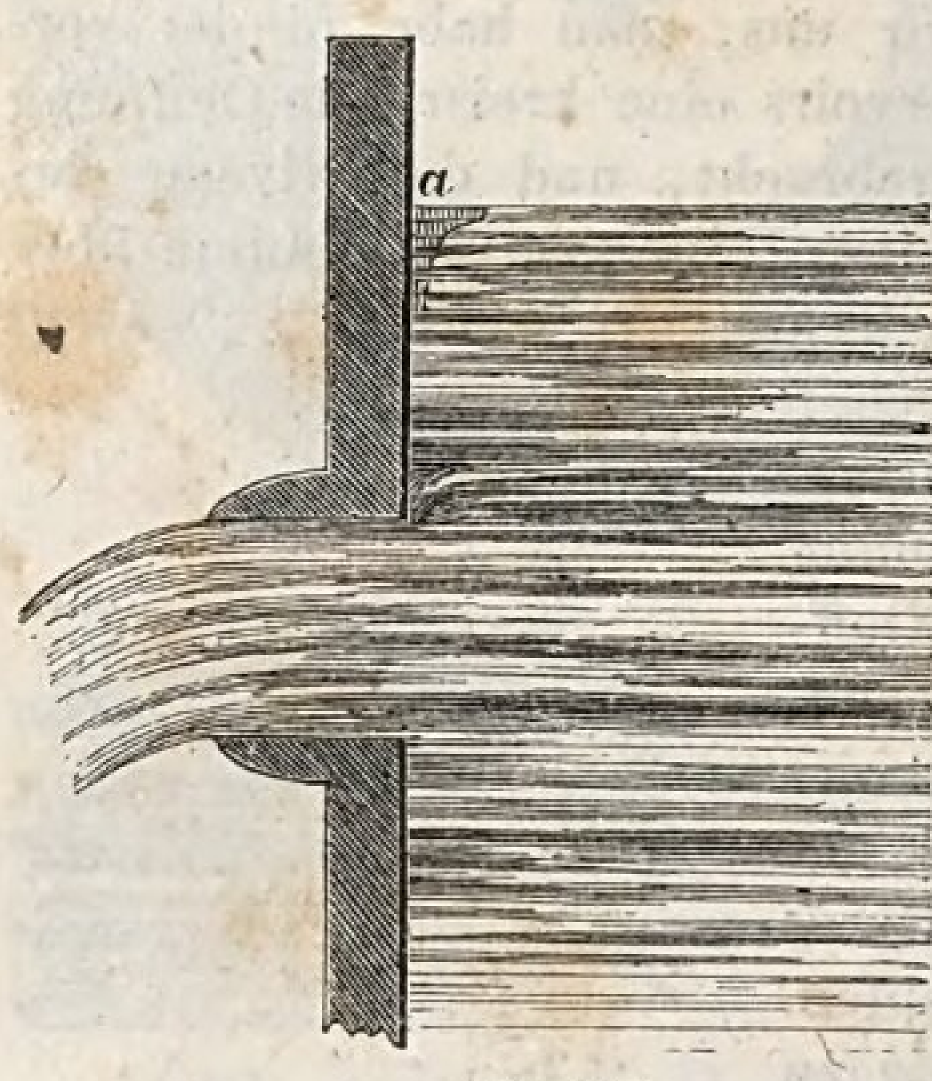


Fig. 541.

Der neue *Prony*'sche Wasserzoll, der jedoch keine allgemeine Aufnahme gefunden hat, entspricht einer kreisrunden Oeffnung von 2 cm Durchmesser und einer Druckhöhe von 3 cm über dem oberen Rand derselben, welche Druckhöhe durch einen Index *a*, der an der Wand befestigt ist, vorgezeichnet wird (Fig. 541 in halber natürlicher Grösse). Das Wasser fliesst durch ein cylindrisches Ansatzröhrchen von 17 mm Länge; die Ausflussmenge beträgt 20 Cubikmeter in 24 Stunden.

§. 418. **Die hydraulische Presse.** — Das Princip, auf welchem die hydraulische Presse beruht, haben wir schon oben (§. 274) kennen gelernt. Wir wollen uns hier nun damit beschäftigen, die Einrichtung dieser Maschine näher zu beschreiben. Die Figur 542 zeigt die ganze Maschine in der Art, wie sie zusammengestellt ist; die Fig. 543 ist ein Durchschnitt, dazu bestimmt, die inneren Theile sichtbar zu machen. Ein sehr starker Cylinder A umschliesst den Kolben B, auf welchen durch Vermittlung des Wassers ein grosser Druck ausgeübt werden soll. Dieser Kolben B trägt oben eine Platte C, die mit ihm beweglich ist. Zwischen dieser und der festen Platte D, die mit dem Cylinder A durch starke Säulen E, E in Verbindung steht, kommt der zu pressende Körper zu liegen. Das Wasser wird in den Cylinder A mittelst einer Pumpe F geführt. Ein Hebel GH, der um den Punkt H beweglich ist, endigt sich in einen Handgriff G, an welchem er gefasst wird; er erhält eine hin- und hergehende Bewegung, indem man diesen Handgriff abwechselnd hebt und

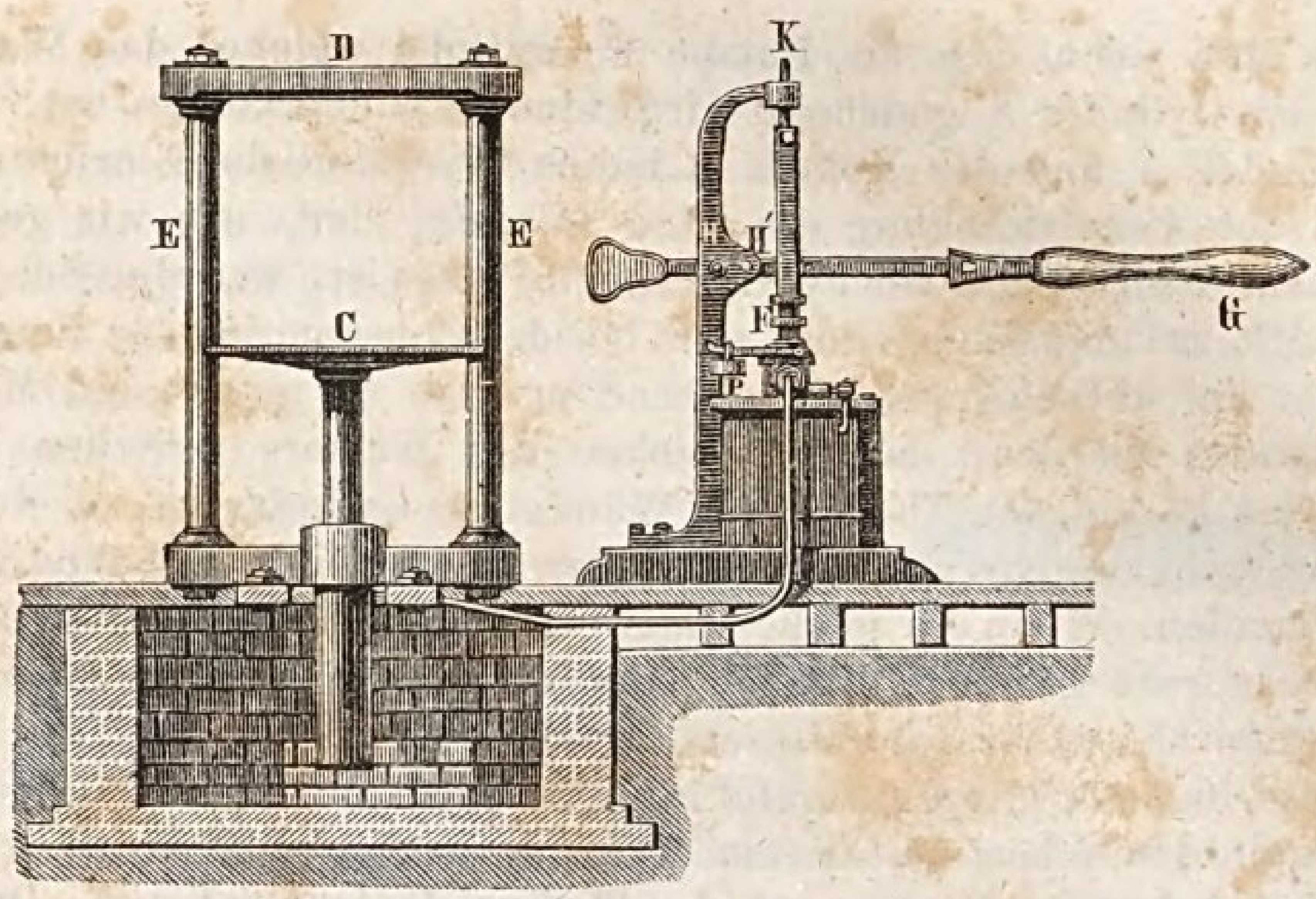


Fig. 542.

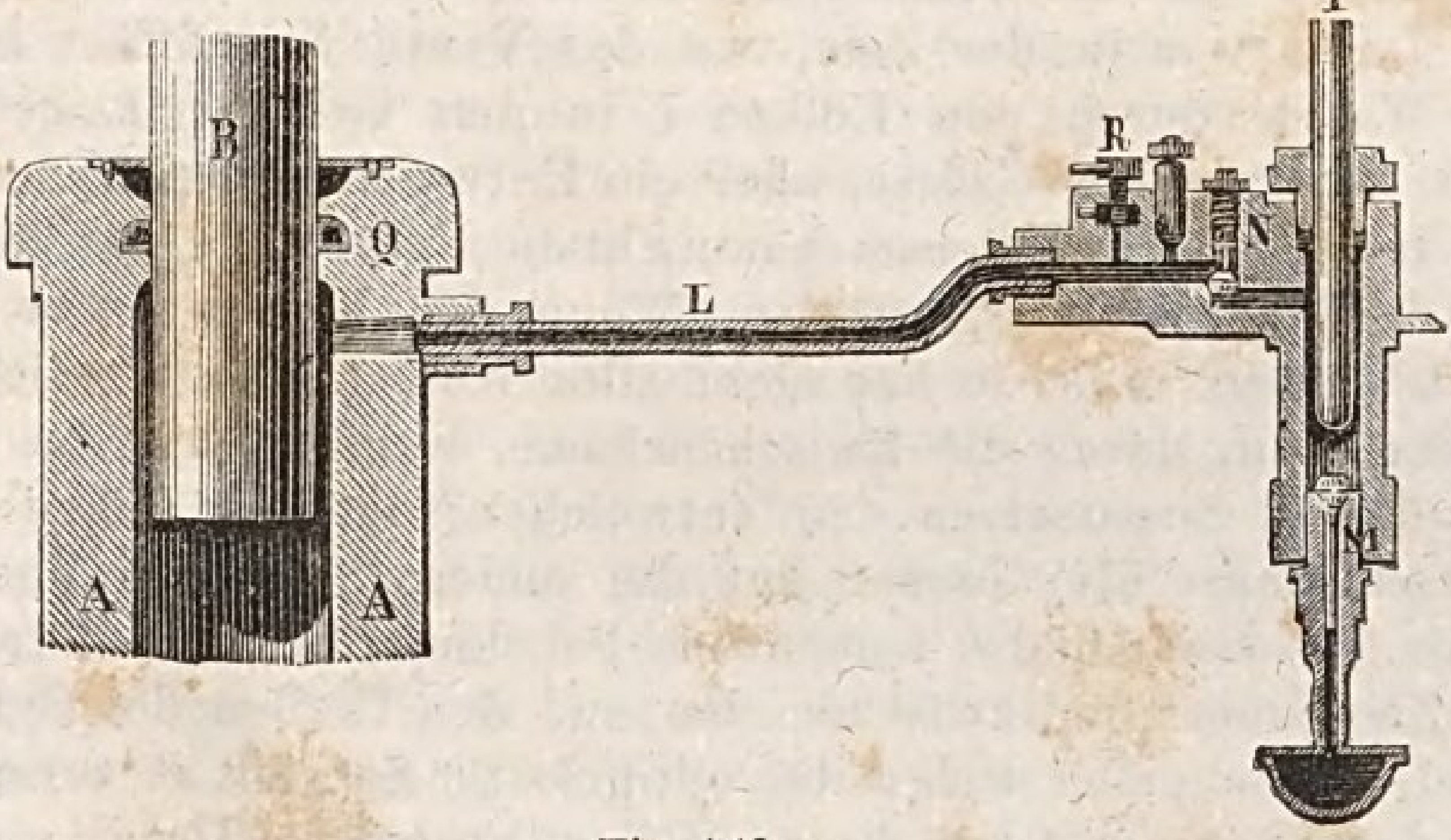


Fig. 543.

senkt. Diese Bewegung überträgt sich auf den Kolben I der Pumpe F, dessen Stange mit dem Hebel GH durch eine kleine Lenkstange verbunden ist. Die Bewegung des Kolbens wird durch einen feststehenden Ring K, durch welchen der obere Theil seiner Stange hindurchgeht, gerade geführt. Bei jedem Kolbenzug wird das Wasser aus einem unterhalb der Pumpe befindlichen Reservoir in die Röhre L gedrückt, die mit dem Cylinder A in Verbindung steht. Bei M und N sind zwei Ventile, welche die Verbindung des Pumpenstiefels mit der Saugröhre und mit der Druckröhre L abwechselnd herstellen und unterbrechen.

Man sieht, dass die Pumpe F, mittelst welcher das Wasser in den Cylinder A gedrückt wird, einen Taucherkolben hat. Der Cylinder A und der Kolben B haben eine ähnliche Einrichtung. Bei der Verwirklichung der Idee *Pascals*, der, wie wir gesagt haben, der Erfinder der hydraulischen Presse ist, war eine Schwierigkeit zu überwinden, die sich bei der Construction der Pumpen nicht in so hohem Grade geltend macht: es musste ein Mittel gefunden werden, das Entweichen des Wassers zwischen dem Kolben B und den Theilen der Wände des Cylinders A, an denen er sich bei seiner aufsteigenden Bewegung reibt, vollständig zu vermeiden. Wenn ein solches Entweichen des Wassers, wenn auch nur in sehr geringer Menge, möglich wäre, so würde bald die geringe Quantität des Wassers, welches bei jedem Zug des Kolbens I in den Cylinder A geführt wird, den Austritt einer gleichen Menge des schon in diesem Cylinder enthaltenen Wassers zur Folge haben, und der auf den Kolben B fortgepflanzte Druck würde eine ziemlich niedere Grenze nicht überschreiten können. Der Druck auf die Flächeneinheit unter den beiden Kolben B und I ist zwar in der Zeit, wo das Ventil N geöffnet ist und das Wasser durch den Kolben I in den Cylinder A gedrückt wird, von gleicher Grösse, aber ein Entweichen des Wassers um den letzten Kolben herum hat nicht die Folgen wie das, welches bei dem Kolben B stattfindet. Wenn der Kolben I nur etwas rasch bewegt wird, so hat nicht alles Wasser, gegen welches er drückt, Zeit, durch die Zwischenräume, welche wir längs seiner Oberfläche voraussetzen, zu entweichen; und ein Theil dieses Wassers muss also immer auf die andere Seite des Ventils N treten. Es kommt also namentlich bei dem Kolben B darauf an, alle Zwischenräume zwischen ihm und den Theilen der Cylinderwand, an denen er sich reibt, mit grösster Sorgfalt zu vermeiden; nur dann kann der auf diesen Kolben ausgeübte Druck eine bedeutende Grösse erreichen und dieselbe auch noch behalten, wenn nicht mehr auf den Kolben I gewirkt wird.

Der englische Ingenieur *Bramah* war der erste, dem es (im Jahre 1796) gelungen ist, die eben angegebenen Bedingungen zu erfüllen und eine wirkliche anwendbare Maschine nach dem Principe *Pascals* zu construiren. Seit dieser Zeit spielt die hydraulische Presse, die desshalb auch oft Bramahpresse genannt wird, eine sehr wichtige Rolle in der Industrie. Das von *Bramah* erdachte Mittel, das Entweichen des Wassers rings um den Kolben B zu verhindern, besteht darin, dass er um diesen Kolben eine eigenthümliche Lederliderung gelegt hat. Dieselbe

wird von einer Art von Kranz oder Wulst gebildet, den man auf folgende Weise erhält: Man schneidet ein Stück Leder in Form einer kreisrunden Scheibe zu; inmitten dieser Scheibe bringt man eine ebenfalls kreisrunde Oeffnung an, sodass nichts als ein ebener Ring übrig bleibt; nachdem man endlich das Leder durch längeres Liegenlassen in einer Flüssigkeit erweicht hat, formt man diesen Ring so, dass man seine inneren sowohl, wie seine äusseren Ränder unter seine Ebene herabbiegt, sodass er die in Fig. 544 dargestellte Gestalt erhält. Das so zubereitete Lederstück bringt man oben an den Cylinder A in einer kreisrunden Höhlung desselben an, bevor der Kolben B in diesem Cylinder sich befindet. Wenn hierauf auf das Wasser in dem Cylinder A gedrückt wird, so dringt es in die ringförmige Höhlung, welche die Lederrinne bildet, und der Druck, welchen es ausübt, presst die inneren Ränder dieser Rinne gegen die Oberfläche des Kolbens an und zwar um so stärker, je grösser der Druck des Wassers ist, sodass ein Entweichen des Wassers in dem Maasse, als sich der Druck vergrössert, immer weniger möglich wird.



Fig. 544.

Wenn man den zu pressenden Körper zwischen die beiden Platten C und D (Fig. 542) gebracht hat, und man wirkt auf den Hebel GH, so hat man anfangs nur einen geringen Druck auf das Wasser auszuüben. Dieser Druck vermehrt sich in dem Maasse, als der Körper zusammengedrückt wird, und man muss daher immer mehr und mehr Kraft aufbieten, um die Pumpe F zu bewegen. Wenn der grösste Druck, welchen man auf diese Weise, indem man auf das Ende des Hebels GH wirkt, auf das Wasser ausüben kann, nicht ausreicht, um den gewünschten Zweck hervorzubringen, so zieht man den Zapfen H, der als Stützpunkt des Hebels dient, heraus und steckt ihn bei H′ ein. Auf diese Weise vermindert man den Hebelarm, auf welchen der Widerstand, den der Kolben I erfährt, wirkt, um die Hälfte; man kann folglich mit derselben Kraft, die an dem Handgriff G angreift, einen grösseren Druck auf die Flüssigkeit im Innern ausüben.

Um zu verhindern, dass der auf die Flüssigkeit übertragene Druck zu gross wird, wodurch eine Beschädigung gewisser Theile der Maschine hervorgerufen werden könnte, bringt man nahe der Pumpe F ein Sicherheitsventil an, das in Fig. 545 besonders abgebildet ist. Ein Kegelventil O verschliesst einen Kanal, durch welchen sich das im Innern der Presse enthaltene Wasser nach aussen ergiessen könnte. Dieses Ventil hat von

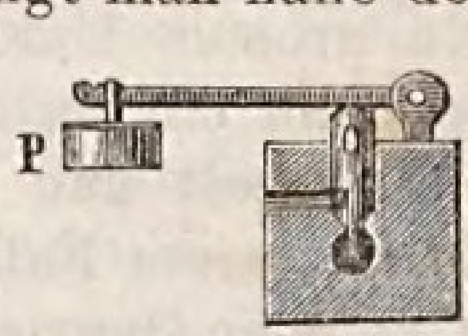


Fig. 545.

oben her einen Druck zu erleiden, welcher durch einen Hebel, der an seinem einen Ende durch ein Gewicht P belastet ist, hervorgebracht wird. Die Grösse dieses Gewichtes wird vorher in der Art bestimmt, dass das Ventil O dem Drucke der Flüssigkeit nicht eher nachgibt, als bis dieser Druck eine gewisse Grenze, die er nicht überschreiten soll, erreicht hat.

Die Schraube R (Fig. 543), deren unteres Ende ein Ventil bildet, verschliesst für gewöhnlich einen anderen Kanal, durch welchen, wenn er offen wäre, die Flüssigkeit in der Presse gleichfalls ausfliessen könnte. Man bedient sich dieser Schraube, wenn man die Wirkung der Presse beendigen will. Indem man sie im passenden Sinne dreht, öffnet man den Kanal, welchen sie verschliesst; das in der Presse enthaltene Wasser ergiesst sich theilweise nach aussen, und der Kolben B, welcher nun nicht mehr dem Drucke der Flüssigkeit ausgesetzt ist, bewegt sich abwärts, in das Innere des Cylinders A hinein.

Man könnte sich fragen, ob die verschiedenen Formen, welche dem unteren Theil des Kolbens B gegeben werden können, keinen Einfluss auf den Gesammtdruck haben, mit welchem er zu heben gesucht wird. Ist bei demselben Druck, welchen man mit Hilfe des Kolbens I auf die Flüssigkeit ausübt, die Wirkung auf den Kolben B nicht grösser, wenn man ihn unten in eine concave Fläche endigen lässt, als wenn er in eine Spitze ausläuft? Wenn man die Gesetze bezüglich der Drückungen, welche eine Flüssigkeit auf die Wände, mit denen sie in Berührung ist, ausübt (§§. 277—282), wohl verstanden hat, so wird man keinen Augenblick im Zweifel sein, dass der Gesammtdruck, welcher den Kolben B zu heben sucht, keineswegs von der Form des Theils dieses Kolbens, der in die Flüssigkeit eintaucht, abhängt; derselbe wird lediglich durch die Grösse des Querschnitts des Kolbens durch den Theil desselben, der mit dem inneren Rand der oben beschriebenen Lederrinne in Berührung steht, bestimmt. Wenn dieser Querschnitt 10-, 100-, 1000 mal so gross ist als der in ähnlicher Weise erhaltene des Kolbens I, so wird der Druck auf den Kolben B 10-, 100-, 1000mal so gross sein als derjenige, welchen man auf dem Kolben I mittelst des Hebels GH ausübt (§. 274). Man muss hier nicht vergessen, dass unter diesem Gesichtspunkt ein grosser Unterschied zwischen den Gesetzen des Druckes, welchen ein fester Körper von Seiten einer in Ruhe befindlichen Flüssigkeit und seitens einer Flüssigkeit in Bewegung erfährt. In letzterem Fall können die Drückungen für Körper von dem nämlichen Querschnitt, welchen eine und dieselbe Flüssigkeit mit

der nämlichen Geschwindigkeit begegnet, sehr verschieden sein, wenn die Oberflächen, gegen welche die Flüssigkeit anstösst, nicht dieselbe Form haben.

§. **419.** Die hydraulische Presse wird in der Industrie vielfach angewendet. Man bedient sich ihrer zur Pressung des Tuchs und Papiers, bei der Fabrikation der Wachskerzen, der Nudeln u. s. w. Ueberall, wo man einen sehr starken Druck auszuüben hat, nimmt man gewöhnlich seine Zuflucht zu den hydraulischen Pressen, deren Gebrauch sehr einfach und bequem ist. So prüft man in Frankreich die eisernen Ketten und Taue, welche für die Marine bestimmt sind, indem man sie einer Zugkraft unterwirft, die durch eine hydraulische Presse hervorgebracht wird.

Wir haben oben gesagt, dass die Räder der Eisenbahnwägen an den Enden ihrer Achsen festgemacht sind, sodass jede Achse mit den beiden Rädern an ihren Enden ein einziges festes Stück bildet. Die Achse und jedes der beiden Räder werden indessen jedes besonders gemacht, und erst nachdem diese drei Stücke fertig sind, werden sie vereinigt. Zu diesem Zwecke dreht man die Enden der Achsen so ab, dass sie eine leicht conische Form erhalten, und bringt in den Naben der Räder Oeffnungen von genau ähnlicher Form an, die dazu bestimmt sind, die Enden der Achse aufzunehmen. Aber diese Stücke sind so gearbeitet, dass man die Enden der Achsen in die Oeffnungen der Räder nur unter Anwendung einer sehr bedeutenden Kraft eintreiben kann. Hier ist es wieder die hydraulische Presse, zu der man gewöhnlich seine Zuflucht nimmt, um diese Kraft auszuüben.

In neuerer Zeit hat man in England eine Röhrenbrücke gebaut, welche die Meerenge zwischen der Grafschaft *Carnarvon* und der Insel *Anglesey* überschreitet. Diese Brücke, welche eine Gesammtlänge von 455 Metern hat, wird von zwei ungeheuren Blechröhren gebildet, die neben einander angebracht sind, und in deren Innern die beiden Geleise der Eisenbahn von *Chester* nach *Holyhead* laufen; sie wird zwischen ihren Endpunkten nur von drei Pfeilern getragen, die sie in vier Theile theilen, deren beide mittelste, als die grössten, jeder 140 Meter Spannweite hat. Die Stücke der Röhre, welche diesen beiden mittleren Trägern entsprechen, wurden einzeln am Ufer des Meeres gefertigt; man schaffte sie dann auf Kähnen zwischen die entsprechenden Pfeiler und hob diese kolossalen Röhren, wiederum durch Anwendung hydraulischer Pressen, auf ihre Pfeiler empor. Ueberhaupt hat die Verwendung der hydraulischen Presse als Krahn in neuerer Zeit in England grosse Verbreitung gefunden.

IV. Anwendung des Wassers als Motor.

§. 420. **Herstellung eines Wassergefälls.** — Als wir oben (§. 241) die verschiedenen Arten der Motoren aufzählten, bezeichneten wir das fliessende Wasser als einen Motor von grösster Wichtigkeit. Wir sind nun im Stande, die Art der Wirkung dieses Motors, sowie die Einrichtung der verschiedenen Kraftmaschinen (§. 242), welche diese Wirkung aufnehmen, um sie auf andere Mechanismen der verschiedensten Art, die eine gewisse nützliche Arbeit verrichten sollen, zu übertragen, näher kennen zu lernen.

Die Bewegung des fliessenden Wassers entspringt aus der Wirkung der Schwere. Indem irgend ein Molekül der Flüssigkeit ein Stück seines Weges durchläuft, senkt es sich um eine gewisse Höhe vertikal herab; durch diese Senkung wird eine gewisse Menge Bewegungsarbeit hervorgebracht, welche man erhält, wenn man das Gewicht des Moleküls mit dem Höhenunterschied der beiden Endpunkte seines Weges, den es durchlaufen hat, multiplicirt (§. 27). Diese Arbeit, welche durch die Wirkung der Schwere auf die verschiedenen Flüssigkeitsmoleküle hervorgebracht wird, ist es, die nutzbar gemacht werden soll, anstatt sie von der Widerstandsarbeit, welche durch die Reibung des Wassers an sich selbst und an den festen Wänden, zwischen denen es fliesst (§. 364), hervorgerufen wird, verzehren zu lassen.

Um dies zu erreichen, baut man quer durch das Bette des fliessenden Wassers einen Damm oder ein Wehr. Dieses Wehr stellt sich der Bewegung des Wassers, das fortwährend an der Stelle, wo es angelegt ist, ankommt, entgegen; daraus folgt, dass sich der Wasserspiegel oberhalb des Wehres erheben, unterhalb desselben dagegen senken muss. Denken wir uns nun, dass sich das Wehr oben in einen horizontalen Rücken endige, und dass das Wasser, nachdem es sich in dem Bette oberhalb des Wehres angesammelt, über dieses Wehr herab in das unter demselben gelegene Bett sich ergiesse, so entsteht dadurch ein sogenannter Ueberfall (§. 371). Die Bewegung des Wassers muss dabei offenbar so stattfinden, dass die in einer gegebenen Zeit über den Ueberfall fliessende Wassermenge genau gleich ist derjenigen, welche in derselben Zeit durch irgend einen Querschnitt des Bettes floss, bevor das Wehr angelegt war. Diese Wassermenge fällt, indem sie sich auf diese Weise aus dem oberen Bett in das untere ergiesst, eine Höhe gleich dem Niveauunterschied der Flüssigkeit in diesen beiden Betten herab; wenn man daher

diese Höhe durch das Gewicht des in einer bestimmten Zeit herabfliessenden Wassers multiplicirt, so erhält man das Maass der Bewegungsarbeit, welche durch das hergestellte Wassergefäll entwickelt wird, und welche durch Anwendung einer geeigneten Kraftmaschine nutzbar gemacht werden kann.

§. 421. **Totaleffekt einer Wasserkraft.** — Nach dem, was wir oben gesagt haben, ist es leicht, die theoretische Leistungsfähigkeit oder den Totaleffekt (§. 242) eines Wassergefälls, das durch den Bau eines Wehres quer durch das fliessende Wasser, dessen Wassermenge bekannt ist (§§. 370—371), erhalten wird, zu berechnen und in Pferdekräften auszudrücken. Man darf nur das in Kilogrammen gemessene Gewicht dieser Wassermenge per Secunde mit dem in Metern ausgedrückten Unterschied des Wasserspiegels im oberen und unteren Bette, d. h. mit der Höhe des Gefälls oder dem Gefäll schlechtweg, multipliciren und hierauf die erhaltene Zahl durch 75 dividiren. Wenn folglich die Wassermenge eines Flusses 36 Cubikmeter per Secunde beträgt und es wird durch ein Wehr ein Gefälle von 1,5 Meter hervorgebracht, so ist der Totaleffekt der gewonnenen Wasserkraft gleich $\frac{36000 \times 1,5}{75} = 720$ Pferdekräfte.

Die Factoren, von welchen die Leistung eines Wassergefälls abhängt, ändern sich mit den verschiedenen Jahreszeiten. Einerseits ist die Wassermenge des fliessenden Wassers bald grösser, bald kleiner; andererseits vermindert sich der Niveauunterschied in dem oberen und unteren Bette, die Gefällshöhe, in dem Maasse als die Wassermenge zunimmt. Aber obgleich sich diese beiden Factoren im entgegengesetzten Sinne ändern, so ändert sich die Leistung des Gefälles doch stets in gleichem Sinne; diese Leistung wird um so grösser, je grösser die Wassermenge des fliessenden Wassers wird.

Wir haben bisher vorausgesetzt, dass das fliessende Wasser, wie es fast immer geschieht, durch ein Wehr aufgestaut wird und durch das Herabfallen von dem dadurch erzeugten Gefälle seine Bewegungsarbeit leistet. Aber auch ohne dieses ist das fliessende Wasser im Stande, allein durch die Geschwindigkeit, welche es besitzt, eine bestimmte Arbeit zu liefern. Diese Arbeit ist nach §. 124 gleich der lebendigen Potenz des Wassers. Man erhält daher den Totaleffekt eines nicht aufgestauten fliessenden Wassers, wenn man die Masse der Quantität Wasser, welche in einer Secunde durch einen Querschnitt des Bettes fliesst, mit dem halben Quadrat seiner Geschwindigkeit multiplicirt. Wenn man

in diesen Ausdruck die Höhe einsetzt, welche das Wasser herabfallen müsste, um die Geschwindigkeit, die es besitzt, zu erhalten, welche Höhe wir kurz Geschwindigkeitshöhe genannt haben, so kann man auch sagen dass die Totalleistung eines fliessenden Wassers gleich dem Gewichte der Wassermenge ist, die in einer Secunde durch den Querschnitt des Bettes fliesst, multiplicirt mit seiner Geschwindigkeitshöhe. — Es ist leicht zu sehen, dass diese Bestimmung ganz mit der bei einem künstlich hervorgebrachten Gefälle gegebenen übereinstimmt, zumal wenn man bedenkt, dass in letzterem Falle die Geschwindigkeit, mit welcher das Wasser an dem Wehr ankommt, vernachlässigt werden kann.

§. 422. **Bedingungen, welche die hydraulischen Motoren zu erfüllen haben.** — Das Wasser eines Gefälles wirkt selten unmittelbar, um eine gewisse Nutzarbeit hervorzubringen; wir werden jedoch später einige Beispiele kennen lernen, wo dies wirklich der Fall ist. Gewöhnlich wirkt das Wasser auf eine Maschine, welche keinen anderen Zweck hat, als seine Wirkung aufzunehmen, um sie hierauf auf andere, sog. Arbeitsmaschinen zu übertragen. Man muss sich natürlich bestreben, diese Kraftmaschinen so zu construiren, dass das Wassergefäll seine gesammte Bewegungsarbeit, welche es hervorbringt, indem das Wasser von dem oberen in das untere Bett herabfällt, auf sie überträgt. Es ist unmöglich diese Bedingung vollständig zu befriedigen; aber man muss suchen, sich diesem Ziele so sehr als möglich zu nähern.

Um eine klare Anschauung über die Kraft eines Wassergefälles zu geben, haben wir vorausgesetzt, dass man quer durch das fliessende Wasser ein Wehr gebaut habe, und dass das Wasser aus dem oberen in das untere Bette frei über den Rücken des Wehrs herabfliesse; die dadurch hervorgebrachte Arbeit muss auf eine Kraftmaschine übertragen werden. Aber es ist nicht nothwendig, dass das Wasser das obere Bette gerade in der Höhe der freien Oberfläche der Flüssigkeit, welche darin enthalten ist, verlässt; man kann auch eine, durch eine Schütze zu verschliessende Oeffnung in dem Wehre anbringen, und zwar entweder ganz unten oder in irgend einem Punkte zwischen den Wasserspiegeln der beiden Bette; die Menge der Arbeit, welche das Wasser hervorzubringen im Stande ist, indem es sich so von einem Bette in das andere ergiesst, ist immer dieselbe, als wenn es von einem Niveau in das andere frei herabfiele. Man überzeugt sich davon leicht, indem man z. B. den Fall untersucht, wo der Ausfluss des Wassers durch eine Schützenöffnung stattfindet, die in der Höhe des

unteren Wasserspiegels gelegen ist. Die Ausflussgeschwindigkeit des Wassers aus dieser Oeffnung ist die nämliche als diejenige, welche es gewinnen würde, wenn es die ganze Gefällhöhe frei herabfiele (§. 335). Wenn man folglich das Wasser, nachdem es seine ganze Geschwindigkeit, welche ihm die Schwere in Folge der Höhe des Gefälles ertheilen kann, erhalten hat, auf eine Kraftmaschine wirken lässt, so ist es gleichgiltig, ob man es auf die eine oder andere der beiden hervorgehobenen Arten im unteren Bette ankommen lässt, weil es in beiden Fällen die nämliche Geschwindigkeit erhält.

Man kann dagegen allerdings einwenden, dass man in dem Fall, wo das Wasser aus dem oberen in das untere Bette durch die Oeffnung einer Schütze fliesst, dieser Oeffnung eine solche Grösse geben könne, dass die in einer gegebenen Zeit ausfliessende Wassermenge grösser ist als die, welche in derselben Zeit über den Rücken des Wehrs herabfallen würde, und dass folglich, da die Geschwindigkeit der Flüssigkeit immer gleich der ist, welche der Gefällshöhe entspricht, die Menge der Arbeit, welche während der Zeit, um die es sich handelt, geleistet wird, durch Anwendung einer Schütze vergrössert werden könne. Diese Vermehrung der Arbeit ist ausser Zweifel; aber man muss bedenken, dass die Schütze, indem sie eine grössere Wassermenge liefert als das fliessende Wasser gibt, eine Senkung des Niveaus im oberen Bette veranlasst; dieses Bett entleert sich und man wird folglich nach kürzerer oder längerer Zeit genöthigt, die Schütze zu schliessen und zu warten, bis es sich von Neuem gefüllt hat. Wenn man folglich die Wirkung eines Gefälles regelmässig und dauernd benützen will, so muss man dafür sorgen, dass z. B. am Anfang jedes Arbeitstages der Wasserspiegel im oberen Bett stets die nämliche Höhe habe; in welcher Weise man folglich auch das Wasser in dem Intervall von 24 Stunden benützt, d. h. welche Oeffnung man während dieser Zeit auch der Schütze gibt, so darf doch die ganze Wassermenge, welche während dieser Zeit durch die Schütze fliesst, die in derselben Zeit durch das fliessende Wasser gelieferte Wassermenge nicht überschreiten. Die Anwendung einer Schütze, welche das Wasser unten am Fuss des Gefälls ausfliessen lässt, kann also keine Vermehrung der gesammten Arbeit, welche durch das Wasser innerhalb eines Tages geleistet wird, hervorbringen; aber die Schütze erlaubt, diese Arbeitsmenge anders zu vertheilen, als es der Fall sein würde, wenn das Wasser, wie wir anfangs vorausgesetzt hatten, frei über den Rücken des Wehrs herabfallen würde.

Wenn man z. B. die Schütze statt 24 täglich nur 12 Stunden geöffnet hält, so kann die in einer Stunde zu leistende Arbeit auf's Doppelte erhöht werden; ein Gefäll, dessen Leistung durch 15 Pferdekräfte ausgedrückt wird (§. 390), kann folglich während dieser 12 Stunden mit 30 Pferdekräften wirken.

Aus dem Vorhergehenden folgt, dass die Menge der Arbeit, welche das Wasser zu leisten vermag, immer die nämliche ist, auf welche Art man es auch aus dem oberen in das untere Bett übergehen lässt. Dabei ist aber natürlich vorausgesetzt, dass die Umstände, unter denen dieser Ausfluss stattfindet, keinerlei Geschwindigkeitsverluste hervorbringen; denn ein solcher Verlust würde nothwendig einen entsprechenden in der Menge von Arbeit nach sich ziehen, welche diese Geschwindigkeit hervorbringen muss, indem sie auf die Kraftmaschine wirkt. Die Oeffnung, durch welche das Wasser ausfliesst, muss also so angebracht werden, dass plötzliche Aenderungen in der Richtung der Flüssigkeitsfäden vermieden sind, d. h. man muss nur abgerundete Oeffnungen anwenden (§. 342); ausserdem muss man es vermeiden, dass das Wasser mit grosser Geschwindigkeit in einem Kanal von gewisser Länge fliesst, damit daraus nicht Geschwindigkeitsverluste, veranlasst durch die Reibung der Flüssigkeit an sich selbst und an den Wänden, entstehen können.

Wenn wir jetzt die Kraftmaschinen, auf welche das Wasser die durch das Gefäll entwickelte Arbeit übertragen soll, näher untersuchen, so werden wir sehen, dass das Wasser in diesen Maschinen mit einer gewissen, grösseren oder geringeren Geschwindigkeit ankommt und dass es sie wieder verlässt, um sich in das untere Bette zu ergiessen. Ohne eine Voraussetzung über die verschiedenen Einrichtungen, welche man einer solchen Maschine geben kann und die wir sogleich ausführlich beschreiben werden, zu machen, können wir doch schon einsehen, dass sie im Allgemeinen zwei wesentliche Bedingungen erfüllen muss. Erstens muss das Wasser ohne Stoss wirken, d. h. es dürfen von dem Moment an, wo es im Begriff ist, in die Maschine einzutreten, bis zu dem Moment, wo es dieselbe vollständig wieder verlassen hat, keinerlei plötzliche Wechsel weder in der Richtung noch in der Grösse der Geschwindigkeit der verschiedenen Flüssigkeitsmoleküle stattfinden. Zweitens muss das Wasser in solcher Weise aus der Maschine austreten, dass es nur eine sehr geringe, wo nicht ganz die Geschwindigkeit Null hat, wenn es in dem unteren Bett ankommt. Denn wenn es daselbst noch eine bemerkenswerthe Geschwindigkeit besässe so würde es im

Stande sein, in Folge dieser Geschwindigkeit noch eine gewisse Menge Arbeit zu leisten und hätte folglich nicht die ganze Arbeit, die es liefern konnte, an die Kraftmaschine übertragen.

Fassen wir nun das Vorhergehende zusammen, so ergibt sich, dass man bei der Anlegung eines hydraulischen Motors immer im Auge haben muss, die folgenden Bedingungen zu befriedigen: 1) das Wasser soll, indem es aus dem oberen Bette in die Maschine gelangt, einen möglichst geringen Geschwindigkeitsverlust erfahren; 2) es soll ohne Stoss wirken; 3) es soll ohne Geschwindigkeit im unteren Bette ankommen. Diese Bedingungen können niemals strenge erfüllt werden, und desshalb ist die Bewegungsarbeit, welche die Kraftmaschine aufnimmt, niemals so gross als der Totaleffekt des Gefälles, welches sie bewegt; sie ist nur ein gewisser Bruchtheil desselben, der grösser oder kleiner ist, je nachdem die Art und Weise der Wirkung des Wassers sich mehr oder weniger dem idealen Zustand nähert, der durch die obigen Bedingungen bezeichnet wird. Wenn es sich ferner um die Leistung handelt, welche die Kraftmaschine selbst zu geben im Stande ist, d. h. um die Nutzleistung derselben (§. 242), so müssen noch die Arbeitsverluste, die von den passiven Widerständen, die in der Maschine selbst zu überwinden sind, herrühren, in Abzug gebracht werden. Das Verhältniss dieser Nutzleistung zum Totaleffekt des Wassergefälls ist das, was wir den Wirkungsgrad der Maschine genannt haben. Um die Güte eines hydraulischen Motors zu prüfen, wird man daher seine Nutzleistung durch den Versuch (§. 243) bestimmen und denselben mit dem Totaleffekt vergleichen, welchen das Wassergefälle liefert; je mehr sich das Verhältniss beider der Einheit nähert, desto vollkommener ist die Maschine. Wenn man also als Wirkungsgrad einer hydraulischen Kraftmaschine 0,60 findet, so heisst das, dass sie 0,60 von dem Totaleffekt des Gefälls oder 60 Procent desselben nutzbar macht.

§. 423. **Unterschlächtiges Wasserrad mit ebenen Schaufeln.** — Gehen wir jetzt auf die verschiedenen Einrichtungen, die man den hydraulischen Motoren gegeben hat, näher ein. Am häufigsten sind diese Motoren Räder, denen das Wasser eine Rotationsbewegung um eine Achse ertheilt, welche entweder eine horizontale oder vertikale Lage hat; diese Räder heissen Wasserräder. Wir beschäftigen uns zunächst mit denjenigen, deren Achse horizontal liegt. Diese theilt man wieder in unterschlächtige, oberschlächtige und mittelschlächtige Räder, je nachdem das Wasser an dem unteren oder an dem oberen Theil, oder

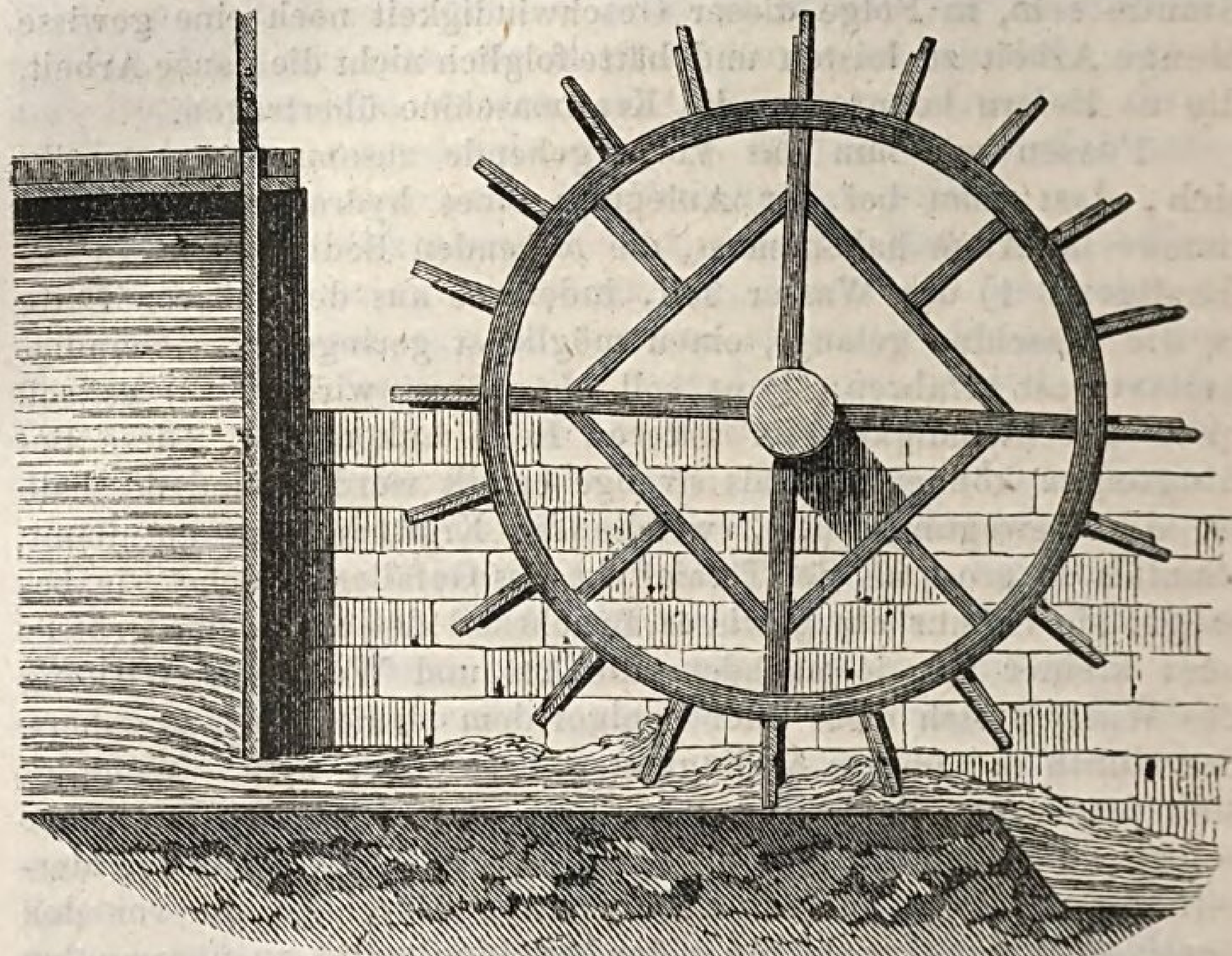


Fig. 546.

auch in irgend einem anderen Punkte des Umfangs des Rades ankommt.

Das unterschlächtige Wasserrad mit ebenen Schaufeln (Fig. 546) ist vor eine Schütze gestellt, die bis auf eine gewisse Höhe aufgezogen ist, um das Wasser unten ausfliessen zu lassen. Das Wasser tritt aus der Schützenöffnung mit der Geschwindigkeit hervor, welche der Höhe des Wasserspiegels im oberen Bett über dieser Oeffnung entspricht. Ein horizontales oder nur sehr wenig geneigtes Gerinne führt es unter das Rad, welchem es eine Rotationsbewegung ertheilt, indem es gegen die Schaufeln, mit denen das Rad ringsum an seinem ganzen Umfang versehen ist, in Folge seiner Geschwindigkeit einen Druck ausübt. Auf diese Weise nimmt das Rad unter der Wirkung des Wassers eine bestimmte Geschwindigkeit an, welche von den Widerständen abhängt, die es zu überwinden hat; diese Geschwindigkeit ist um so kleiner, je bedeutender die zu überwindenden Widerstände sind. Man weiss in der That, dass der durch das Wasser auf die Schaufeln des Rades ausgeübte Druck nicht der nämliche ist, wenn diese Schaufeln in Bewegung sind, als wenn sie still stehen, und dass ferner dieser Druck um so schwächer wird, je schneller

sich die Schaufeln bewegen (§. 382). Es folgt daraus, dass das Rad, um einen gegebenen Widerstand zu überwinden, unter der Wirkung des Wassers eine solche Geschwindigkeit annehmen muss, für welche der Druck des Wassers auf die Schaufeln der Grösse dieser Widerstände entspricht. Wenn durch irgend eine Ursache diese Geschwindigkeit zufällig kleiner würde, so würde der Druck des Wassers gegen die Schaufeln zunehmen; es würde schon ein Theil dieses Druckes hinreichen, um den Widerständen das Gleichgewicht zu halten, der andere Theil würde die Bewegung des Rades so lange beschleunigen, bis das Gleichgewicht zwischen dem durch das Wasser ausgeübten Druck und dem zu überwindenden Widerstande wieder hergestellt wäre. Wenn im Gegentheil das Rad für den Augenblick eine schnellere Bewegung annehmen würde, so würden durch die daraus folgende Verminderung in dem Drucke des Wassers gegen die Schaufeln die Widerstände die Oberhand erhalten, und die Bewegung müsste sich wieder verzögern.

Aus dem Vorhergehenden folgt, dass man dem Rade eine beliebige Geschwindigkeit annehmen lassen kann, wenn man nur die Grösse des zu überwindenden Widerstandes passend regulirt. Aber die Grösse der Arbeit, welche durch die Wirkung des Wassers wirklich auf das Rad übertragen wird, ist nicht die nämliche, ob das Rad diese oder jene Geschwindigkeit besitzt; damit das Rad sehr schnell umläuft, darf es nur einen sehr geringen Widerstand zu überwinden haben; wenn sich ihm dagegen ein sehr bedeutender Widerstand entgegensetzt, so bewegt es sich sehr langsam. Nun hängt die Arbeit, welche das Rad in einer gegebenen Zeit leistet, einmal von der Grösse des überwundenen Widerstandes und dann von der Länge des Weges, welcher während dieser Zeit von dem Angriffspunkte dieses Widerstandes durchlaufen wird, oder, was auf dasselbe hinauskommt, von der Geschwindigkeit des Rades ab. In dem einen, wie in dem andern der beiden äussersten Fälle, welche wir vorhin betrachtet haben, ist das eine der Elemente, aus denen die Arbeit besteht, sehr klein, und daher kann auch die Arbeit nicht gross werden. Es muss also eine gewisse mittlere Geschwindigkeit des Rades geben, bei welcher die geleistete Arbeit ein Maximum, d. h. grösser wird als die, welche das Rad bei allen anderen Geschwindigkeiten entwickelt. Die Versuche haben gezeigt, dass, um dieses Maximum der Arbeit zu erhalten, die Geschwindigkeit des Rades, gemessen an seinem Umfang, 0,45 von derjenigen sein muss, welche das Wasser in dem Moment besitzt, wo es an den Schaufeln des Rades ankommt.

Die unterschlächtigen Räder mit ebenen Schaufeln sind weit davon entfernt, den Bedingungen zu genügen, welche wir im Allgemeinen für die hydraulischen Motoren aufgestellt haben (§. 422). Erstens verliert das Wasser in Folge der Reibung an den Wänden des Gerinnes, in welchem es von der Schütze auf die Schaufeln geführt wird, einen Theil seiner Geschwindigkeit, bevor es noch das Rad erreicht hat; zweitens muss sich die Geschwindigkeit des Wassers in dem Moment, wo es auf eine der Schaufeln des Rades trifft, plötzlich in die Geschwindigkeit des Rads verwandeln; drittens endlich verlässt das Wasser das Rad noch mit bedeutender Geschwindigkeit, durch welche das Sprudeln, das man in dem unteren Bette bis auf ziemlich grosse Entfernung vom Rad bemerken kann, hervorgebracht wird. Desshalb sind die Räder dieser Art schlechte hydraulische Motoren. Wenn man mittelst des Bremsdynamometers die Grösse der Arbeit misst, welche vom Wasser auf das Rad übertragen wird, so findet man, dass in dem Falle, wo die Geschwindigkeit des Rads die günstigste ist, diese Leistung nicht über 0,25 von derjenigen beträgt, welche der Gefällshöhe und der Wassermenge entspricht: es wird also nur der vierte Theil der Wasserkraft nutzbar gemacht; die drei anderen Viertel sind gänzlich verloren.

§. 424. **Oberschlächtiges oder Zellenrad.** — Das oberschlächtige Wasserrad, auch Zellenrad genannt (Fig. 547), ist so eingerichtet, dass es das Wasser in seinem obersten Theile aufnimmt. Dieses Wasser wird ihm durch einen Kanal zugeführt, welcher es dem oberen Bette, und zwar in der Höhe des Wasserspiegels in diesem Bette, entnimmt. Das Wasser nimmt in diesem Gerinne nur die Geschwindigkeit an, die nothwendig ist, damit es das Rad erreichen kann; es fällt hierauf in Zellen, mit denen das Rad auf seinem ganzen Umfange versehen ist, und füllt diese nach und nach in dem Maasse, als sie sich ihm, in Folge der Bewegung des Rades, am Ende des Zuleitungskanals darbieten. Wenn die Zellen an dem unteren Theil des Rades ankommen, so entleert sich das darin enthaltene Wasser in das untere Bett; sie steigen dann auf der anderen Seite leer wieder in die Höhe, um sich an der Stelle, wo sie wieder abwärts zu gehen beginnen, von Neuem zu füllen. Man sieht daraus, dass die Zellen auf der einen, abwärtsgehenden Seite des Rades fortwährend mit Wasser gefüllt sind, während diejenigen, welche sich an dem aufsteigenden Theil des Rades befinden, leer in die Höhe gehen; und es ist eben das Gewicht des Wassers, das in der einen Hälfte des Rades enthalten ist,

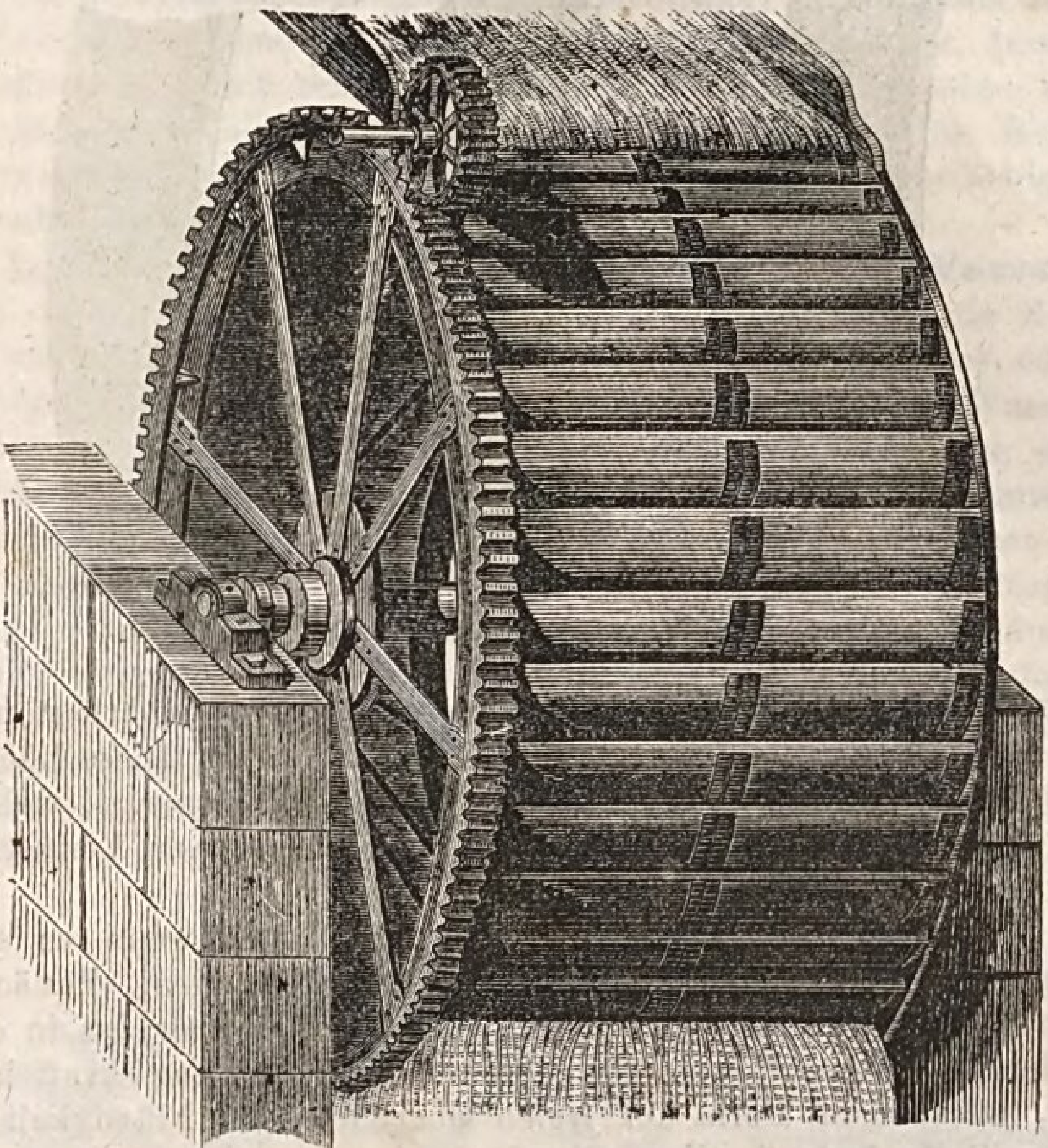
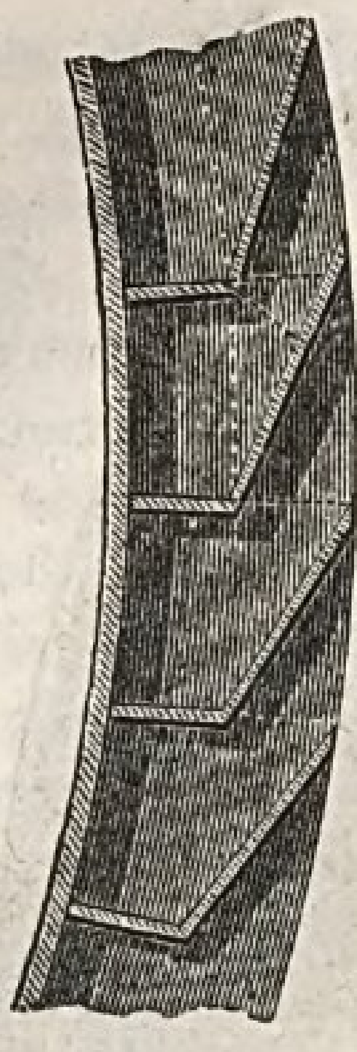
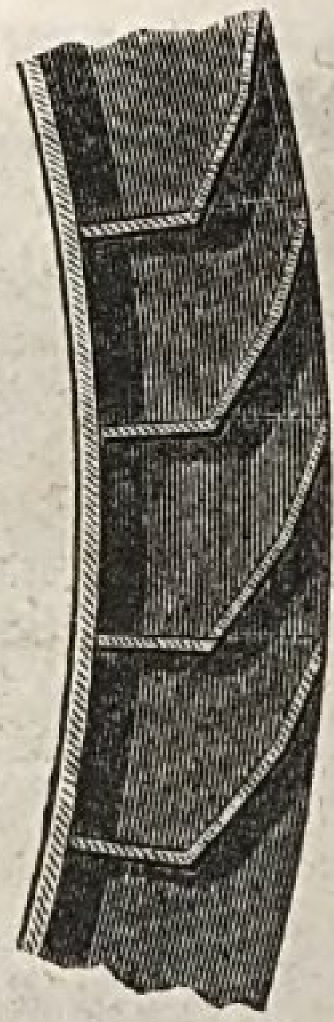


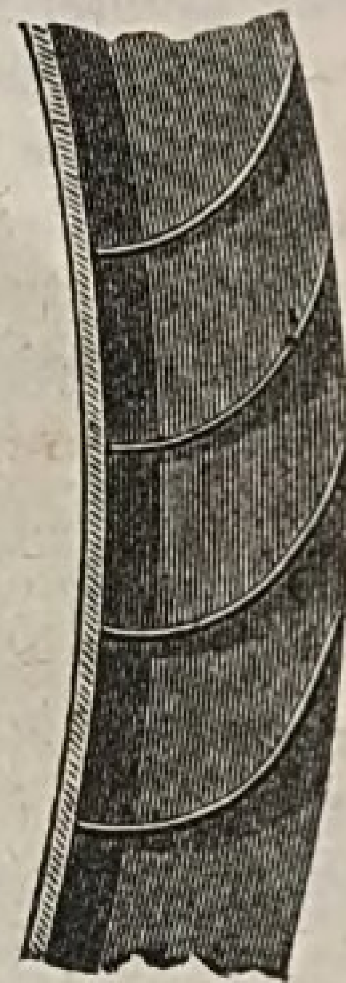
Fig. 547

welches die Bewegung desselben hervorbringt und die Widerstände überwindet.

Bei der Construction eines Rades dieser Art muss man sein Augenmerk besonders darauf richten, die Zellen so einzurichten, dass sie sich erst so weit unten als möglich entleeren; denn wenn das Wasser aus ihnen austritt, bevor es die tiefste Stelle des Rades erreicht hat, so zieht dies einen Verlust an Gefäll nach sich. Aber zu gleicher Zeit muss man auch dafür sorgen, dass die Oeffnungen der Zellen nicht zu eng sind, damit das Wasser ohne Schwierigkeit ein- und wieder austreten kann. Die Figuren 548, 549 u. 550 zeigen einige Formen der Zellen, welche am häufigsten angewandt werden. Damit die Luft sowohl dem Eintritte des Wassers in die Zellen, als dem Ausflusse aus diesen keinen Widerstand entgegensetzt, was für die hervorzu-


Fig. 548.


Fig. 549.


Fig. 550.

bringende Leistung sehr nachtheilig werden könnte, bringt man an dem Boden jeder Zelle einige kleine Löcher an. Diese Löcher veranlassen wohl den Verlust einer gewissen Wassermenge, welche durch sie hindurch aus der Zelle fliesst, aber dieser Verlust ist nur von sehr geringem Belang.

Ein Zellenrad gibt viel bessere Resultate, wenn es sich langsamer dreht, und zwar aus mehreren Gründen. Zunächst bringt die Rotationsbewegung des Rades, an welcher das in den Zellen enthaltene Wasser Theil nimmt, eine Centrifugalkraft hervor, welche die Form der freien Oberfläche der Flüssigkeit in jeder Zelle ändert; diese Oberfläche senkt sich auf der Seite gegen das Innere des Rades zu und erhebt sich gegen aussen, sodass das Wasser früher aus der Zelle auszutreten sucht als es ohne dies der Fall sein würde. Andererseits bringt das Wasser, da es nur mit geringer Geschwindigkeit durch den Zuleitungskanal an dem Rad ankommt, bei seinem Eintritt in die Zellen keinen Stoss hervor, wenn sich das Rad nur langsam dreht; und wenn dann die Zellen sich entleeren, so wird das Wasser so zu sagen ohne Geschwindigkeit in dem unteren Bette abgesetzt. Unter der Bedingung also, dass es nur eine geringe Rotations-Geschwindigkeit besitzt, sieht man, dass das Zellenrad viel besser als das unterschlächtige Rad den allgemeinen Bedingungen genügt, welche die hydraulischen Motoren befriedigen sollen. Desshalb haben gut gebaute Zellenräder auch einen Wirkungsgrad gleich 0,75. Diese Räder müssen für Gefälle zwischen 3 und 12 Metern Höhe allen anderen Rädern vorgezogen werden.

Da die Rotationsbewegung des Zellenrades nur langsam sein soll, so versieht man es gewöhnlich mit einem Zahnkranz, dessen Durchmesser gleich seinem eigenen ist und in dessen Zähne ein viel kleineres Zahnrad eingreift. Man kann so auf die Welle dieses zweiten Rades eine Rotationsbewegung von beliebiger Schnelligkeit übertragen.

§. 425. **Mittel- oder rückenschlächtiges Wasserrad.** — Das mittelschlächtige Wasserrad (Fig. 551) ist ein Rad mit ebenen Schaufeln, an welche sich ein kreisförmiges oder Kropfgerinne dicht anschliesst. Das Rad empfängt das Wasser an dem obersten Theil dieses Gerinnes und steht in Bezug auf die Art der Wirksamkeit des Wassers zwischen dem unterschlächtigen und dem Zellenrad. Das Wasser wirkt zunächst in dem Augenblick, wo es in das Rad eintritt, durch seinen Stoss; hierauf wird es aber durch das Gerinne, welches es verhindert, auf der einen oder anderen Seite auszufliessen, über den Schaufeln gehalten und wirkt also durch sein Gewicht, bis es unten an dem Rade ankommt.

Indem man die Einrichtung des Rades ändert, kann man die eine oder andere dieser beiden Wirkungsarten des Wassers

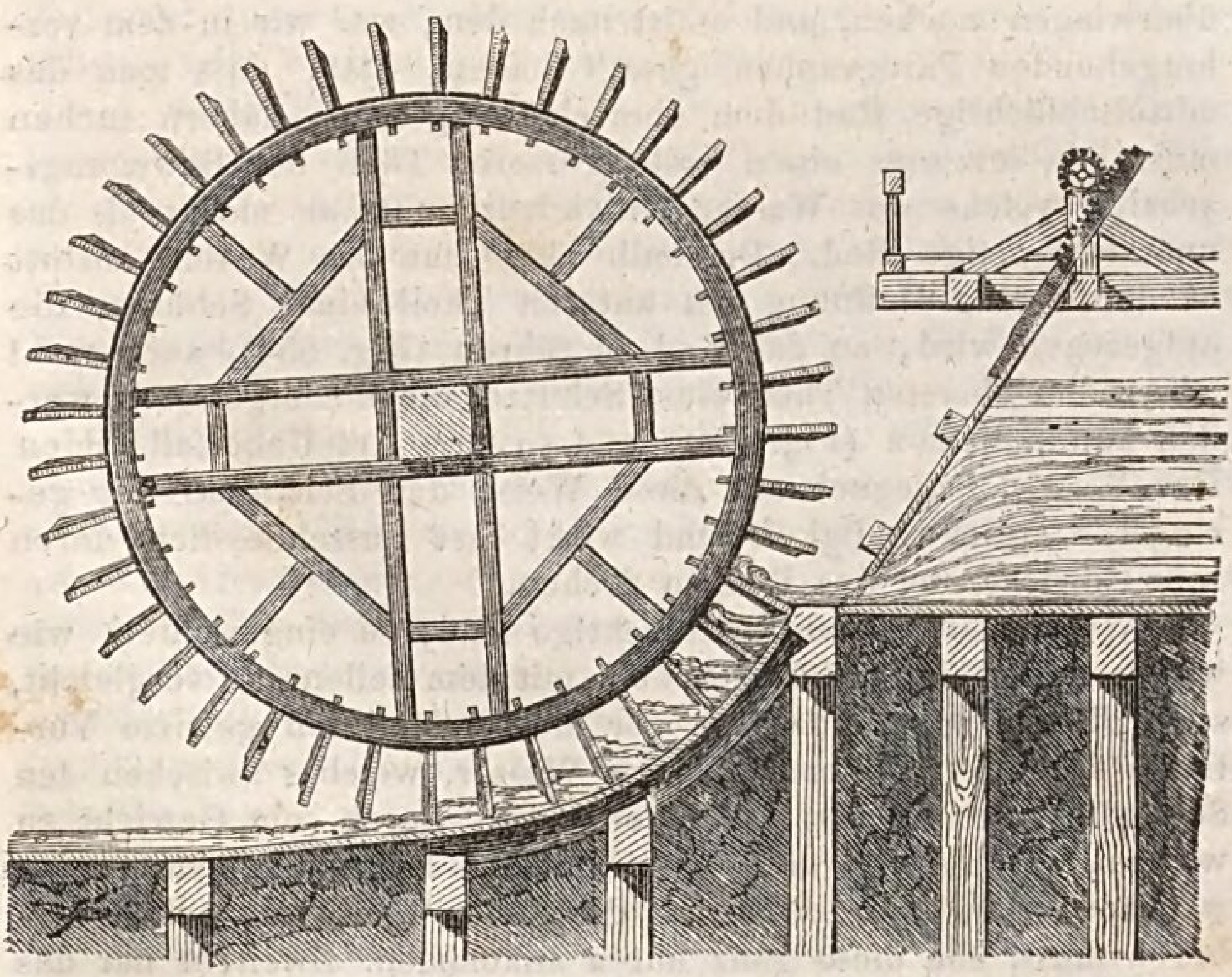


Fig. 551.

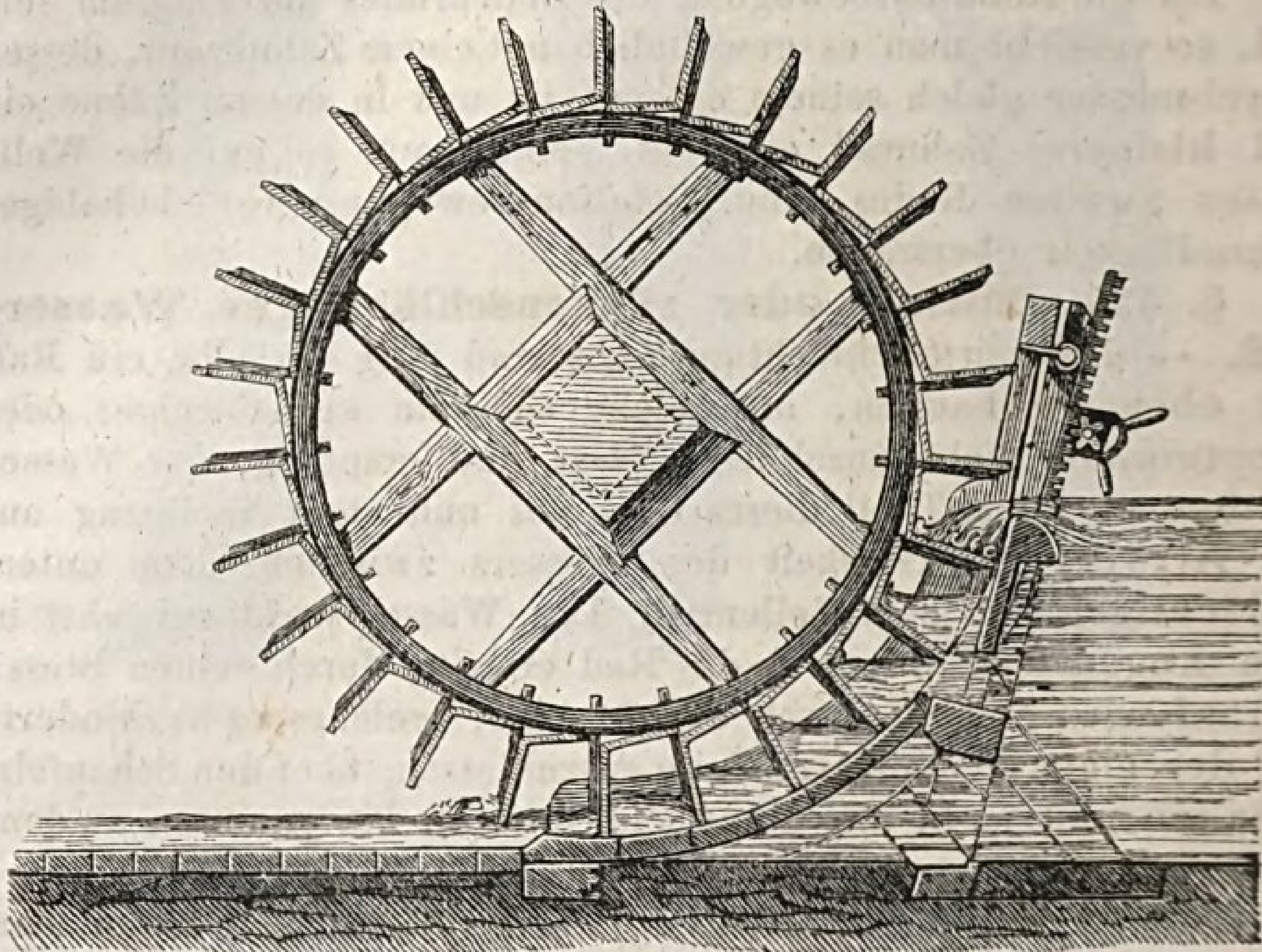


Fig. 552.

überwiegen machen, und es ist nach dem, was wir in dem vorhergehenden Paragraphen gesagt haben, klar, dass man das mittelschlächtige Rad dem oberschlächtigen zu nähern suchen muss, da letzteres einen viel grösseren Theil der Bewegungsarbeit, welche das Wasser entwickelt, nutzbar macht als das unterschlächtige Rad. Desshalb lässt man das Wasser, anstatt es durch eine Oeffnung am unteren Theil einer Schütze, die aufgezogen wird, an das Rad zu führen (Fig. 551), auch wohl über den obersten Theil einer Schütze, die niedergelassen werden kann, fliessen (Fig. 552) und so eine Art Ueberfall bilden Das Wasser begegnet auf diese Weise den Schaufeln mit geringerer Geschwindigkeit und wirkt fast ausschliesslich durch sein Gewicht, um das Rad zu drehen.

Wenn man das mittelschlächtige Rad, so eingerichtet, wie wir es zuletzt beschrieben haben, mit dem Zellenrade vergleicht, so wird man sehen, dass es vor diesem letzteren gewisse Vortheile darbietet. Erstens hört das Wasser, welches zwischen den Schaufeln enthalten ist, nicht eher auf, durch sein Gewicht zu wirken, als bis es ganz unten an dem Rade angekommen ist, während es in dem Zellenrade die Zellen theilweise schon verlassen muss, ehe diese ganz unten ankommen. Zweitens hat das Rad nicht das ganze Gewicht des Wassers, welches auf es wirkt,

zu tragen, da der Druck, welchen das über jeder Schaufel stehende Wasser auf diese Schaufel ausübt, nur die eine Componente des Gewichts dieses Wassers ist und die andere Componente von dem Gerinne getragen wird. Daraus folgt, dass das Rad, obwohl es die nämliche Menge von Arbeit vom Wasser aufnimmt, viel weniger belastet wird, und dass daher die Reibung seiner Welle in den Lagern viel weniger bedeutend ist. Aber diese Vortheile werden wieder durch die Nachtheile aufgewogen, welche daraus entstehen, dass die Zwischenräume, welche nothwendig zwischen den Rändern der Schaufeln und dem Gerinne vorhanden sein müssen, einen Verlust an Wasser veranlassen, sowie dass das Wasser, indem es sich längs des Gerinnes hinbewegt, einen ziemlich bedeutenden Widerstand erfährt. Um den Verlust des Wassers, welches zwischen den Schaufeln und dem Gerinne durchfliesst, nicht zu gross werden zu lassen, ist man genöthigt, das mittelschlächtige Rad schneller umgehen zu lassen, als das Zellenrad; daraus folgt, dass das Wasser das Rad noch mit ansehnlicher Geschwindigkeit verlässt, was wiederum einen Verlust von Arbeit nach sich zieht. Alles zusammen genommen, gibt das mittelschlächtige Rad, so angeordnet, wie es Fig. 552 zeigt, ein weniger gutes Resultat als das Zellenrad, aber es ist dem unterschlächtigen bei weitem vorzuziehen; sein Wirkungsgrad ist ungefähr gleich 0,65.

§. 426. **Ponceletrad.** — Die unterschlächtigen Räder haben vor den ober- und mittelschlächtigen den Vortheil, dass sie sich mit grösserer Geschwindigkeit umdrehen, woraus folgt, dass bei einer und derselben Wassermenge, welche man zur Verfügung hat, das Rad nicht so breit zu sein braucht, weil das Wasser viel kürzere Zeit in ihm bleibt und folglich die Wassermenge, welche das Rad in jedem Augenblick enthält, viel geringer ist.

Man sieht daraus, dass es von grosser Wichtigkeit wäre, wenn man das unterschlächtige Rad so abändern könnte, dass es einen grösseren Theil der durch das Wasser gelieferten Bewegungsarbeit nutzbar macht, ohne den eben bezeichneten Vortheil zu verlieren. Dies hat *Poncelet* erreicht. Das Rad, welches er construirt hat, und welches seinen Namen trägt (Fig. 553), unterscheidet sich von dem unterschlächtigen Rad, von dem wir oben (§. 392) gesprochen haben, nur dadurch, dass die ebenen Schaufeln desselben durch gekrümmte ersetzt sind, die nahezu Tangenten an den äusseren Umfang des Rades bilden.

Es ist leicht zu begreifen, dass in Folge dieser Einrichtung die Arbeit, welche vom Wasser auf das Rad übertragen wird, grösser ist als in dem Falle, wo die Schaufeln eben sind. Zunächst

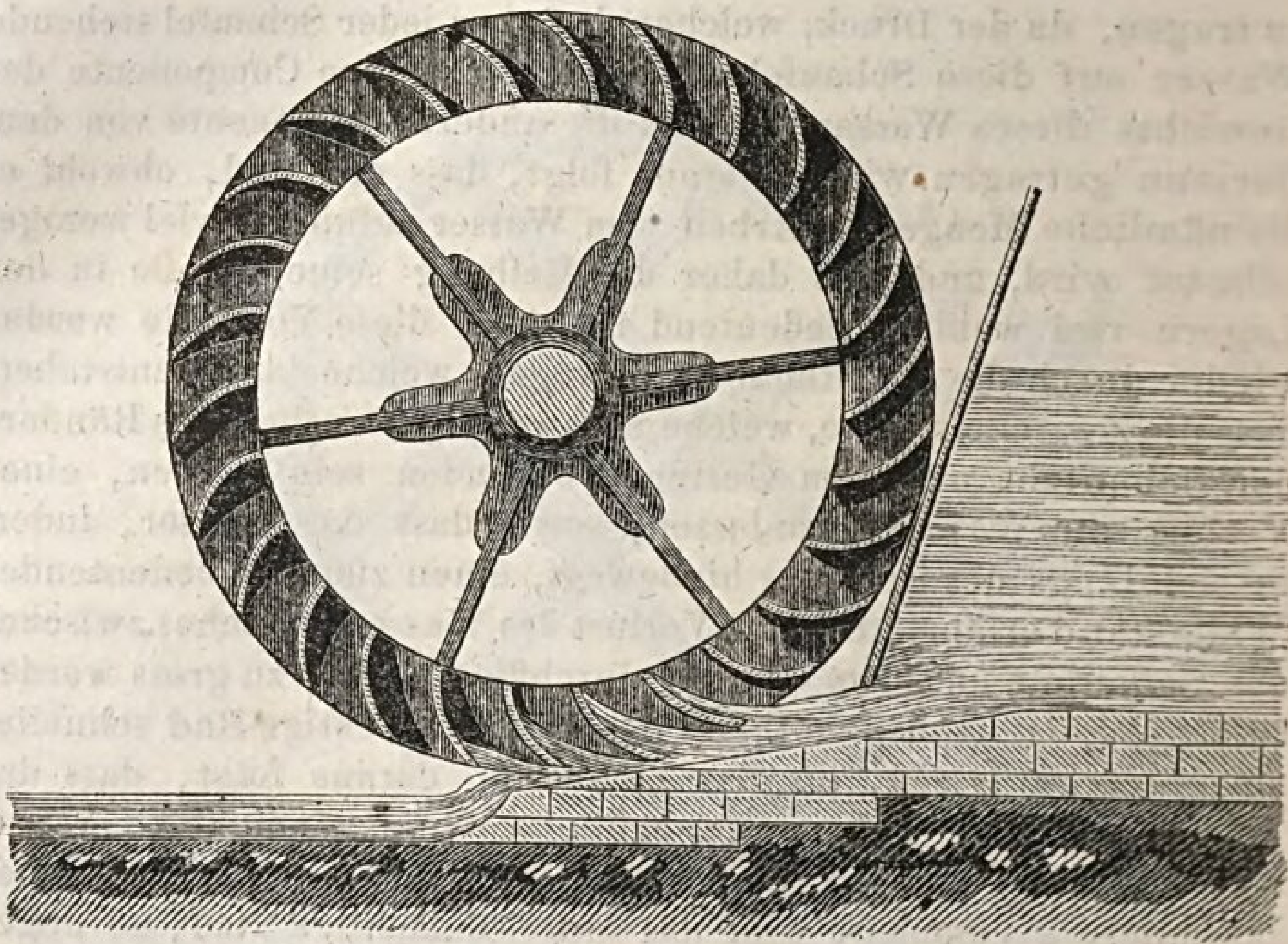


Fig. 553

bringt das Wasser bei seinem Eintritt in das Rad keinen Stoss gegen die Schaufeln hervor, weil diese Schaufeln in Folge der ihnen gegebenen Form der Flüssigkeit nur ihre schmale Kante darbieten. Andererseits verlässt das Wasser, wenn man das Rad eine passende Geschwindigkeit annehmen lässt, die Schaufeln nur mit sehr kleiner Geschwindigkeit, wie man leicht erkennt, wenn man das Verhalten des Wassers in dem Rad von seinem Eintritt bis zu seinem Austritt etwas näher untersucht. In der That sieht man, dass das Wasser, da es in jede Schaufel mit einer grösseren Geschwindigkeit, als diese selbst besitzt, eintritt, über die Oberfläche der Schaufel hingleitet und sich in ihr erhebt, bis die Schwere seine aufsteigende Bewegung völlig zerstört; von da an fliesst es wieder herab und nimmt auf diese Weise eine im Verhältniss zu den Schaufeln immer grösser werdende rückwärts gerichtete Geschwindigkeit an. Wenn es sich folglich trifft, dass diese relative Geschwindigkeit des Wassers in Bezug auf die Schaufel in dem Moment, wo es die Schaufel verlässt, gleich derjenigen ist, welche das Rad an seinem Umfang besitzt, so befindet sich das Wasser unter denselben Umständen, als wenn die letzten Theile der gekrümmten Schaufel unter ihm wegglitten, ohne es mitzunehmen; seine absolute Bewegung wird also Null. Das Ponceletrad befriedigt sonach, soweit dies bei einem unterschlächtigen

Rad überhaupt möglich ist, die oben (§. 422) angegebenen allgemeinen Bedingungen fast vollständig.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Geschwindigkeit dieses Rads an seinem Umfange 0,55 von der des Wassers sein muss, damit man seinen Maximaleffekt erhält. In diesem Fall erhebt sich sein Wirkungsgrad auf 0,56 und selbst auf 0,60, während der des unterschlächtigen Rades mit ebenen Schaufeln, wie oben gesagt, blos 0,25 ist.

§. 427. **Räder, welche frei in einem weiten Kanale oder Fluss hängen.** — Um die verschiedenen Wasserräder mit horizontaler Achse vollständig kennen zu lernen, müssen wir noch von den Rädern mit ebenen Schaufeln reden, welche man frei in einen Strom oder Fluss hängt, sodass sie mit ihrem unteren Theil in das Wasser desselben tauchen. Diese Räder (Fig. 554), welche man gewöhnlich zur Seite von fest verankerten Schiffen

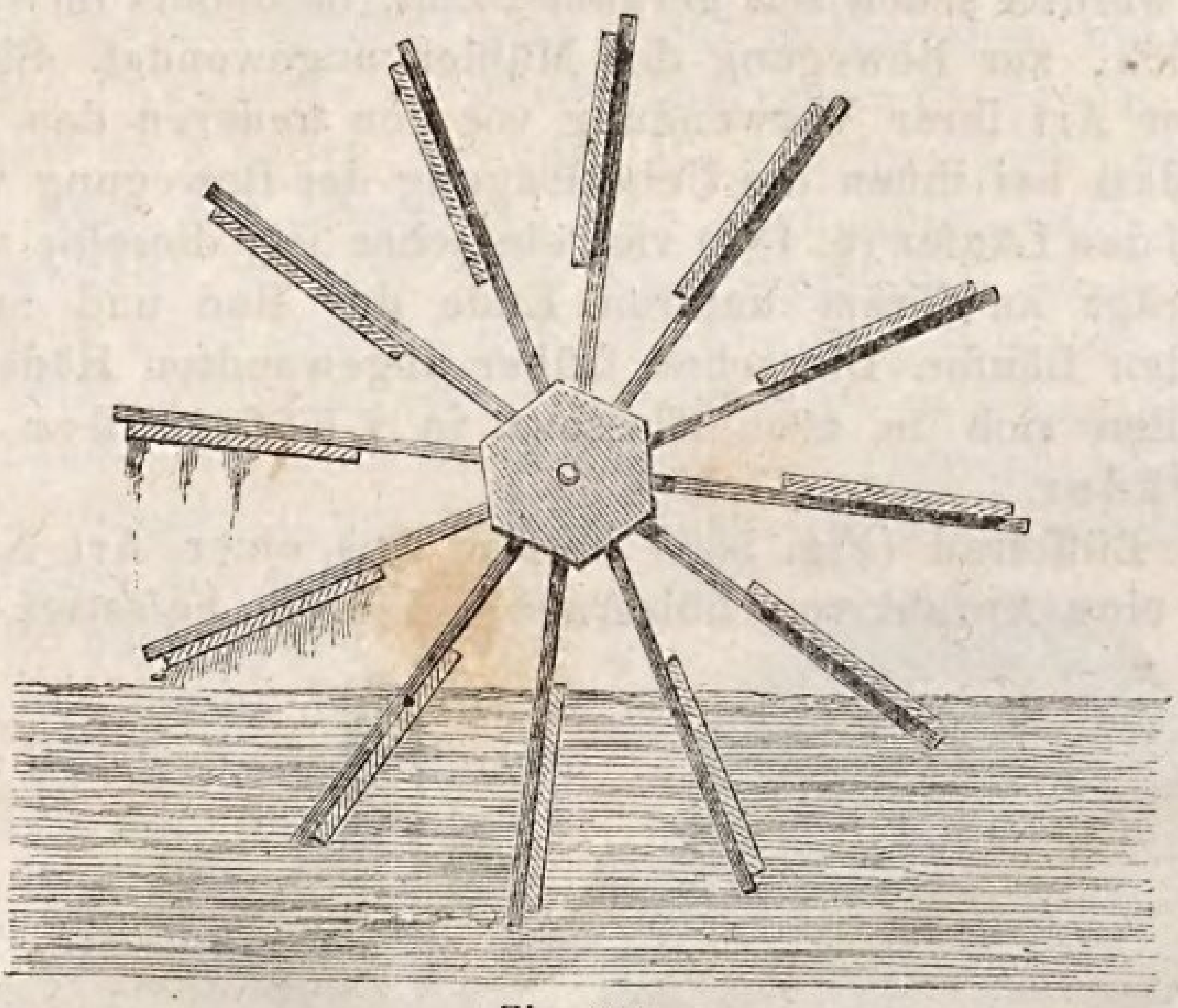


Fig. 554.

anbringt, werden allein durch den Druck des in Bewegung befindlichen Wassers auf die in dasselbe tauchenden Schaufeln in Bewegung gesetzt. Es handelt sich hier nicht darum, genau abzuwägen, welche Form man dem Rad geben muss, um durch seine Anwendung einen grösseren oder geringeren Bruchtheil der Bewegungsarbeit des Wassers, welches man zur Verfügung hat, nutzbar zu machen. Diese Bewegungsarbeit, welche die Gesammtheit des Wassers, das den Fluss hinabfliesst, liefert, ist übermässig gross; man hat nur nöthig, einen geringeren Theil derselben

nutzbar zu machen, und ist gewöhnlich in der Breite, welche man dem Rade geben kann, durch Nichts beschränkt. Desshalb zieht man es vor, ein Rad von sehr einfacher, obwohl weniger vortheilhafter Construktion anzuwenden, indem man durch eine grössere Breite der Schaufeln das zu erreichen sucht, was in anderen Fällen, bei engerer Beschränkung im Raume sowohl, als in der verfügbaren Kraft, durch eine bessere Einrichtung auch bei weniger grossen Dimensionen erzielt wird.

Ein Rad dieser Art liefert nicht immer dieselbe Arbeit, wenn es sich in dem nämlichen Flusse einmal schneller, einmal langsamer bewegt. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Geschwindigkeit der Schaufeln, in der Mitte ihrer Höhe genommen, 0,40 von der des Wassers sein muss, damit die durch das Wasser auf das Rad übertragene Arbeit möglichst gross wird.

§. 428. **Löffelrad.** — Die Räder mit vertikaler Achse werden schon seit geraumer Zeit, besonders im südlichen Frankreich, zur Bewegung der Mühlen angewendet. Sie haben bei dieser Art ihrer Verwendung vor den anderen den Vortheil voraus, dass bei ihnen die Uebertragung der Bewegung von dem Rade auf den Läufer (§. 187) viel einfacher ist; dieselbe vertikale Welle trägt an ihrem unteren Ende das Rad und an ihrem oberen den Läufer. Die schon früher angewandten Räder dieser Art theilen sich in zwei Klassen: in Löffelräder und in Kufenräder.

Ein Löffelrad (Fig. 555) besteht aus einer Art Nabe, in welcher eine Anzahl von hölzernen Schaufeln befestigt ist, die

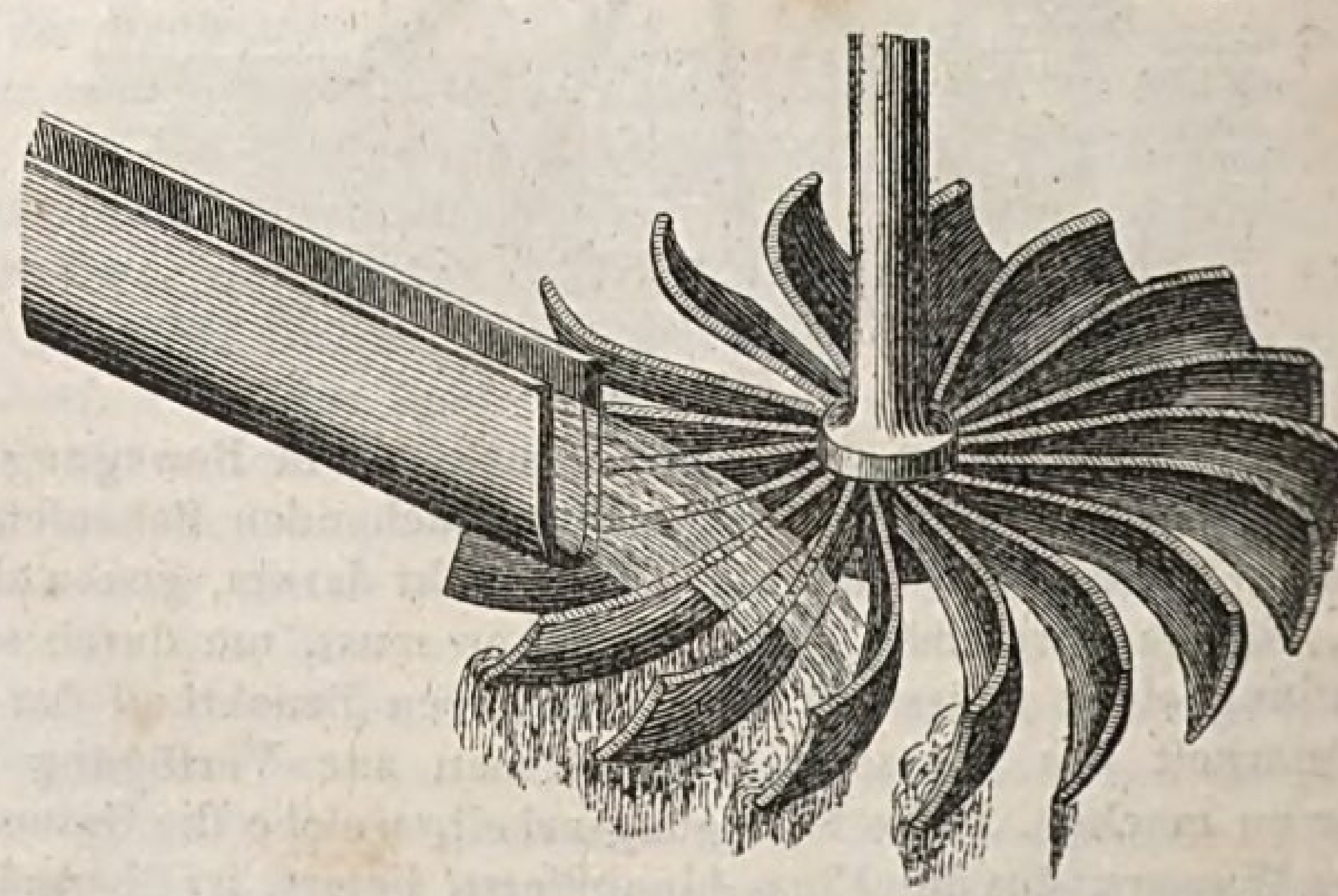


Fig. 555.

so geformt sind, dass sie dem Wasser eine concave und schiefe Fläche darbieten; diese Schaufeln bezeichnet man mit dem Namen Löffel. Das Wasser wird auf das Rad durch einen kleinen Kanal von Holz oder durch eine Rinne geführt, die an dem unteren Theil eines Reservoirs angebracht ist. Indem sich das Rad dreht, übt das Wasser nach einander auf jeden der Löffel seine Wirkung aus und die auf einander folgenden Stösse, welche das Rad auf diese Weise erhält, unterhalten seine Bewegung.

Man hat gefunden, dass diese Räder ungefähr den dritten Theil der durch das Wassergefäll entwickelten Bewegungsarbeit nutzbar machen und dass zu diesem Behufe die Geschwindigkeit der Punkte des Rads, welche direkt den Stoss des Wassers empfangen, ungefähr 0,70 von derjenigen der Flüssigkeit sein soll. Diese Räder empfehlen sich wegen ihrer grossen Einfachheit namentlich für grosse Gefälle mit wenig Wasser.

§. 429. **Kufenrad.** — Die Kufenräder haben eine ähnliche Form wie die Löffelräder; aber anstatt freizustehen und auf diese Weise den Stoss eines an ihrem Umfange auftreffenden Flüssigkeitsstrahls zu erhalten, befinden sie sich innerhalb einer cylindrischen Kufe von Mauerwerk, die nach unten offen ist. Das Aufschlagwasser wird in diese Kufe tangentiell an ihrem Umfange durch einen Kanal A geführt (Fig. 556), der sich über der oberen Seite des Rades endigt; in der Kufe angelangt nimmt es eine drehende Bewegung an und wirkt nun stossend und drückend gegen die Schaufeln des Rades, indem es in den Zwischenräumen zwischen den gekrümmten Schaufeln nach unten strömt und in das untere Bett fällt.

Die Bewegung des Wassers in der Kufe ruft eine Reibung hervor, die seine Geschwindigkeit bedeutend vermindert; andererseits fliesst ein Theil des Wassers durch die Zwischenräume zwischen dem Umfang des Rads und den Wänden der Kufe nach unten, ohne eine Wirkung hervorzubringen. Desshalb macht ein Kufenrad nicht mehr als 0,16 der zur Verfügung stehenden Totalleistung der Wasserkraft nutz-

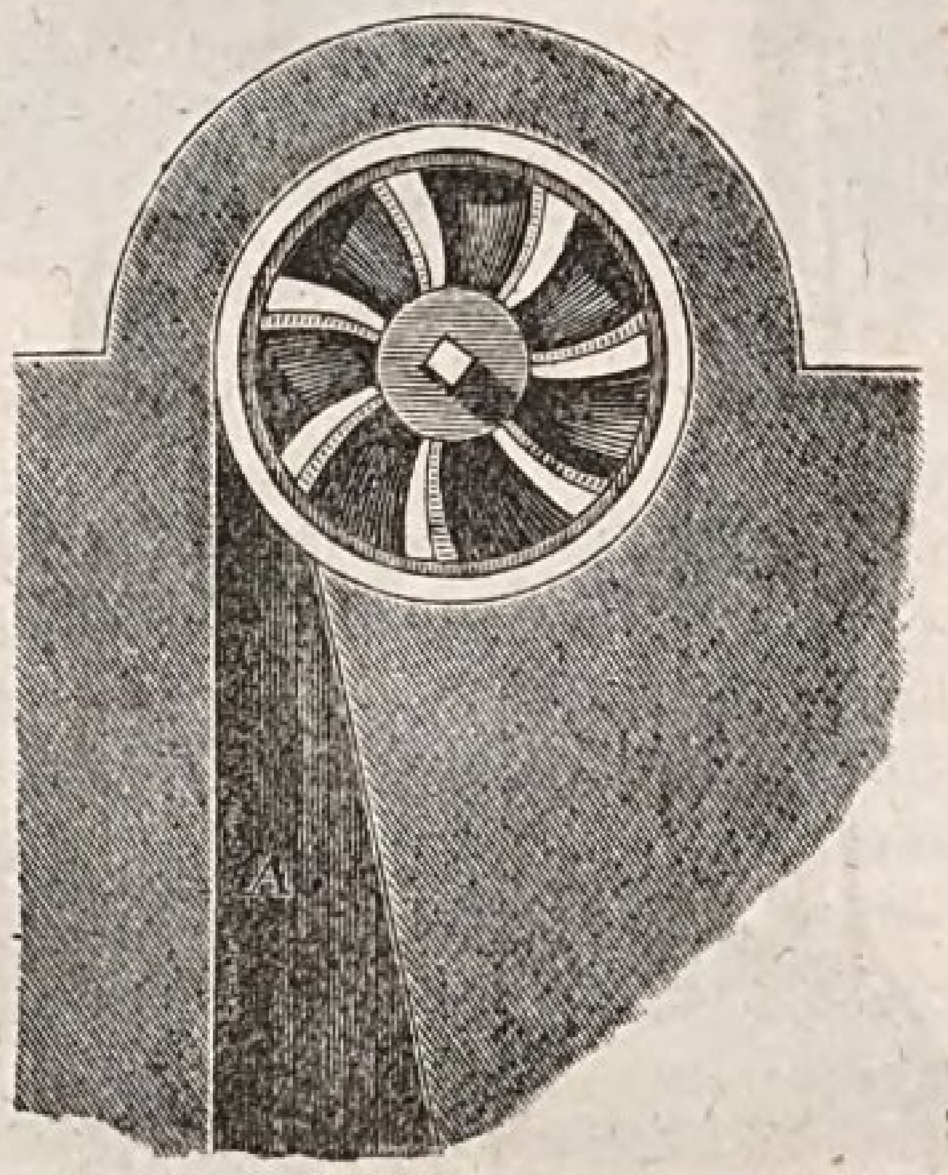


Fig. 556.

bar, und selbst wenn es mit aller möglichen Sorgfalt construirt ist, übersteigt sein Wirkungsgrad nicht 0,25. Die Kufenräder werden besonders dann angewendet, wenn man eine grosse Wassermenge mit geringem Gefäll hat.

§. 430. **Reaktionsräder.** — Denken wir uns ein mit Wasser gefülltes Gefäss, so übt die Flüssigkeit in demselben auf jede Stelle der Seitenwand einen Druck aus, der normal zu dieser Stelle gerichtet ist und dessen Grösse wir früher bestimmen gelernt haben. Es ist nicht schwer einzusehen, dass sich diese Drückungen sämmtlich das Gleichgewicht halten und das Gefäss folglich unter ihrem Einfluss in Ruhe bleiben muss. Wenn man aber an einer Stelle der Seitenwand des Gefässes eine Oeffnung anbringt (Fig. 557), durch welche das Wasser ausfliesst, so macht sich ein einseitiger Druck in entgegengesetzter Richtung des Ausflusses geltend, der das Gefäss in dieser Richtung zu bewegen sucht und dies auch wirklich thut, wenn es leicht genug beweglich ist. Man sagt hier, das Wasser wirke durch seine R e a k t i o n. Wenn man an einem mit Wasser gefüllten Gefäss, das so eingerichtet ist, dass es sich leicht um eine vertikale Achse drehen kann (Fig. 558), unten zwei horizontale Röhren anbringt, die mit Seitenöffnungen versehen sind, sodass das Wasser in senkrechter Richtung auf diese Röhren, und zwar aus beiden nach entgegengesetzten

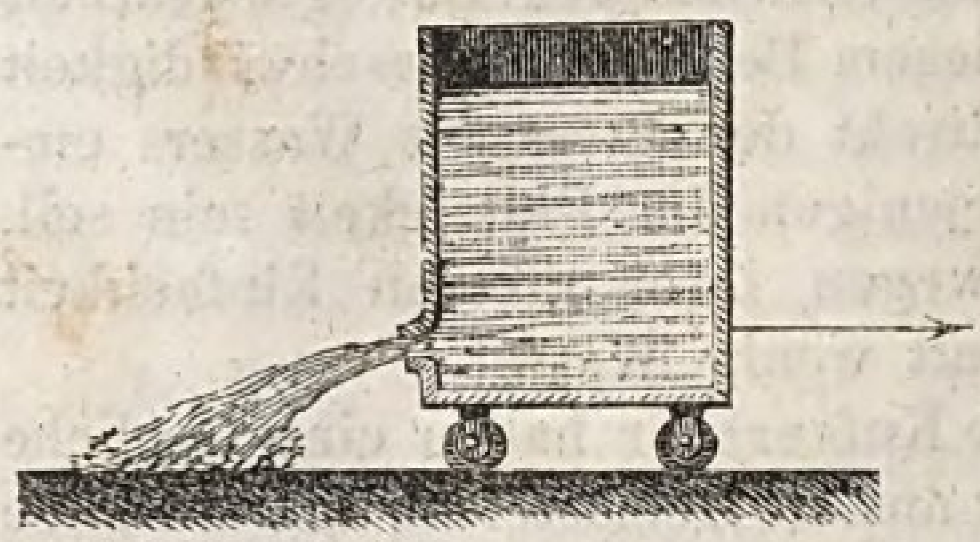


Fig. 557.



Fig. 558.

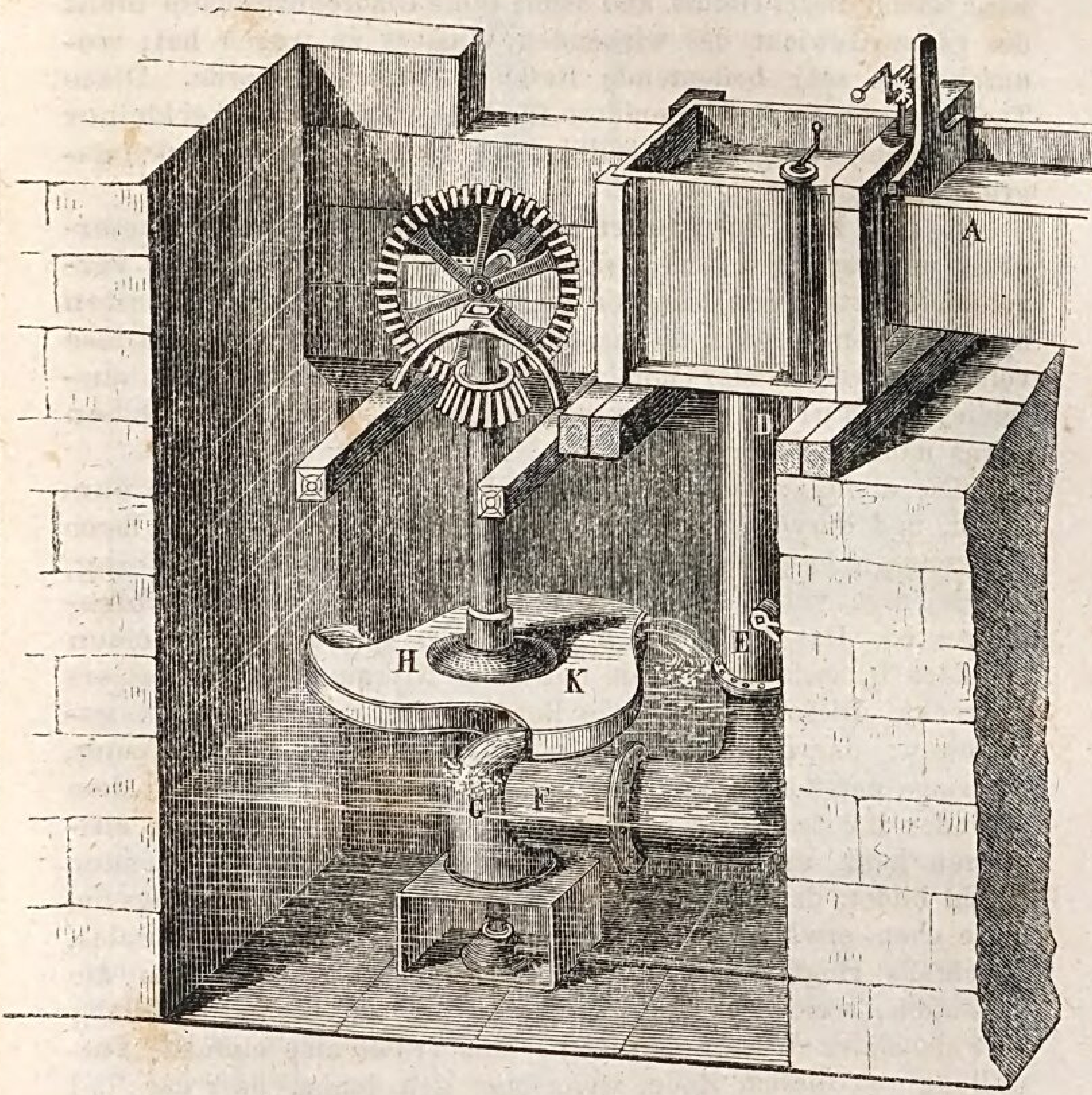


Fig. 559.

Seiten hin, ausströmen kann, so wird das Gefäss in Folge der stattfindenden Reaktion des Wassers in einem der Richtung der ausfliessenden Strahlen entgegengesetzten Sinne herumgedreht. Man nennt einen solchen Apparat *Segner*'sches Wasserrad, auch Reaktionsapparat. Auf demselben Principe wie diese Vorrichtungen beruhen die hydraulischen Motoren, die man Reaktionsräder, auch schottische oder *Whitelaw*'sche Turbinen nennt. Eine solche schottische Turbine zeigt die Figur 559, deren Einrichtung wohl ohne weitere Erläuterung aus dem Vorhergehenden klar ist. Wir fügen nur hinzu, dass das Aufschlagwasser A dem Ausflussgefäss H K durch eine Röhre D E F G von unten zugeführt

wird, damit dieses Gefäss und somit seine Umdrehungsachse nicht das ganze Gewicht des wirkenden Wassers zu tragen hat, wodurch eine sehr bedeutende Reibung entstehen würde. Diese Turbinen eignen sich besonders für Wasserkräfte, die bei kleiner Wassermenge ein grosses Gefäll haben; sie geben einen Wirkungsgrad von 0,50 bis 0,60.

§. 431. **Die Fourneyron'sche Turbine.** — Die Wasserräder mit vertikaler Achse sind seit ungefähr 33 Jahren so vervollkommnet worden, dass sie gegenwärtig den Rang der besten hydraulischen Motoren, die man anwenden kann, einnehmen. Diese vollkommneren Räder mit vertikaler Achse nennt man ausschliesslich T u r b i n e n. Wir wollen nun die Einrichtung derselben etwas näher kennen lernen.

Die erste Turbine, welche durch die Vortheile, die sie darbietet, und durch die guten Resultate, welche sie bezüglich ihres Wirkungsgrades gibt, die allgemeine Aufmerksamkeit auf sich zog, ist diejenige von *Fourneyron*. Sehen wir, wie dieselbe eingerichtet ist. Das Aufschlagwasser A (Fig. 560) gelangt in einen Cylinder B, welcher sich bis unter das Niveau des Unterwassers erstreckt. Dieser cylindrische Behälter ist an seiner Basis geschlossen; dagegen besitzt er seitwärts, bei C C, eine Oeffnung, die rings um ihn herumgeht, sodass das Wasser, welches in dem Cylinder BB ankommt, ungehindert durch diese Oeffnung ausfliessen kann und auf diese Weise einen zusammenhängenden Strahl bildet, der nach allen Richtungen hin ausströmt. Rings um diese eben erwähnte ringförmige Oeffnung ist ein horizontales, gleichfalls ringförmiges Rad D so angebracht, dass sich die Schaufeln, welche es besitzt, überall dem aus obiger Oeffnung entweichenden Wasser darbieten. Man erhält eine einfache Vorstellung von diesem Rade, wenn man sich denkt, dass das Rad der Fig. 553 (Seite 828) mit gekrümmten Schaufeln horizontal liege, und dass man seine Arme, welche den Kranz mit der Welle verbinden, abgenommen habe, damit die Basis des Behälters B in sein Inneres eindringen kann. Eine Art von eisernem Teller E E verbindet den Kranz des Rades mit einer Welle F F, die sich vertikal erhebt, indem sie durch das Innere einer Röhre, die inmitten des Behälters B angebracht ist, hindurch geht. Das Rad taucht vollständig in das Unterwasser ein, dessen Niveau sich in G befindet. Die Welle F endigt unten in einen Zapfen, der sich in einer Pfanne gegen den Hebel HK stützt, der um den Punkt K beweglich ist. Eine Stange L, die an dem Ende H des Hebels befestigt ist, endiget oben in eine Schraube, in welche

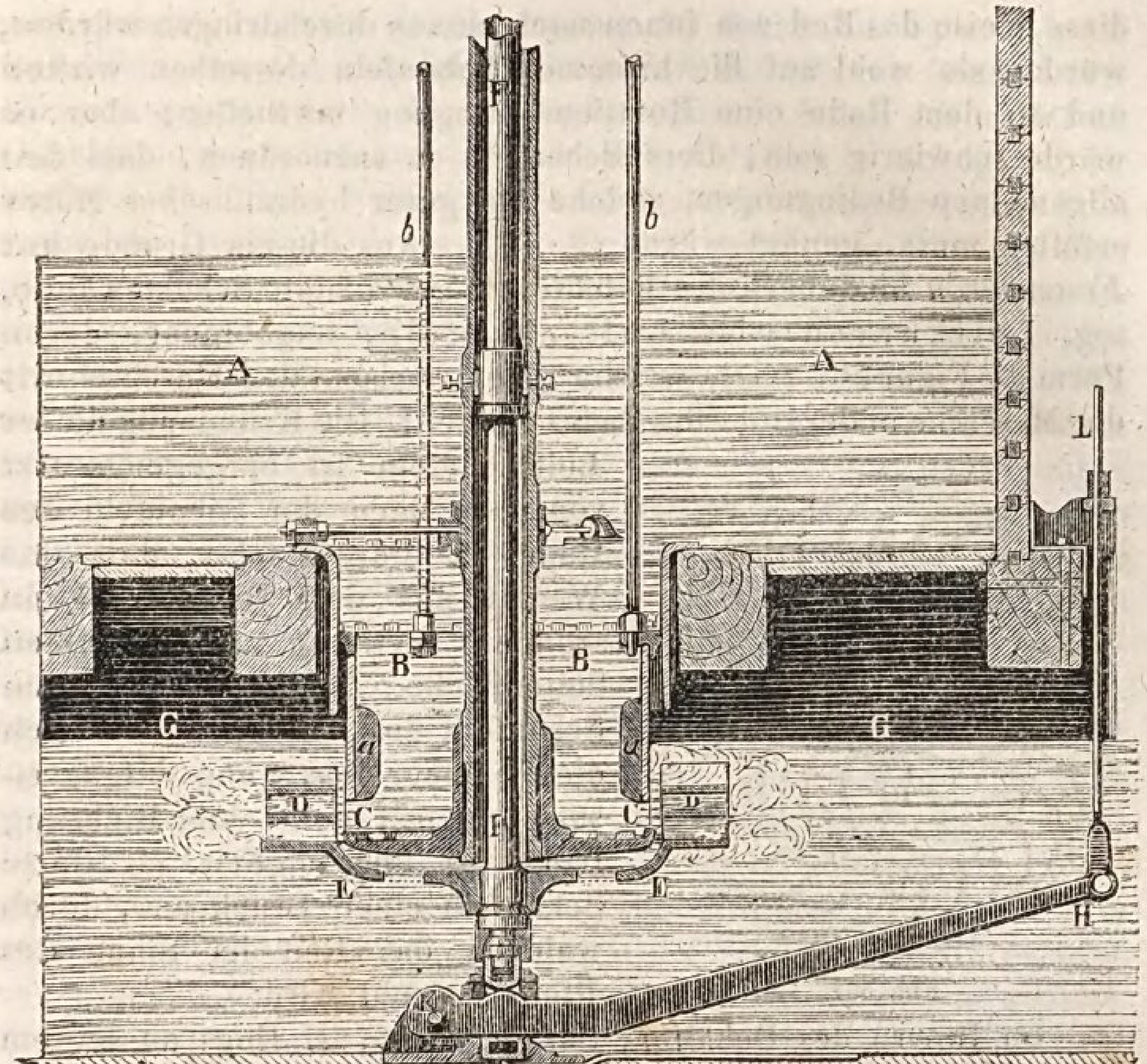


Fig. 560.

eine Mutter eingreift. Indem man diese Mutter, die durch feststehende Stücke an einer fortschreitenden Bewegung gehindert ist, dreht, kann man die Welle F mit dem Rade, welches sie trägt, nach Belieben heben und senken und auf diese Weise das Rad DD der Oeffnung CC, durch welche das Wasser aus dem Behälter B ausfliesst, genau gegenüberstellen.

Der Umstand, dass das Rad in das Unterwasser eintaucht, verhindert nicht, dass das Wasser des Behälters BB durch die Oeffnung CC ausfliesst und auf die Schaufeln, mit denen jenes Rad ringsum umgeben ist, wirkt. Dieser Ausfluss wird durch den Höhenunterschied der Wasserspiegel im oberen und unteren Bette hervorgebracht. — Wenn das Wasser im Innern des Behälters B in seiner Bewegung nicht geleitet würde, so würden die Flüssigkeitsmoleküle an den verschiedenen Punkten der Oeffnung C in der Richtung der Radien, also in senkrechter Richtung gegen die Seitenwände dieses Behälters, ausströmen. Indem sie auf

diese Weise das Rad von innen nach aussen durchdringen würden, würden sie wohl auf die krummen Schaufeln desselben wirken und so dem Rade eine Rotationsbewegung mittheilen; aber es würde schwierig sein, diese Schaufeln so anzuordnen, dass den allgemeinen Bedingungen, welche ein guter hydraulischer Motor erfüllen muss, genügt würde (§. 422). Aus diesem Grunde hat *Fourneyron* im Innern des Behälters B gekrümmte Scheidewände, sog. Leitkurven oder Leitschaufeln, angebracht, deren Form die Figur 561 zeigt, welche einen horizontalen Durchschnitt der Maschine in der Höhe des Rades vorstellt. Die Krümmung dieser Leitschaufeln ist entgegengesetzt von derjenigen der Schaufeln des Rades D. Daraus folgt, dass das Wasser aus dem Behälter B in schiefer Richtung gegen dessen Seitenfläche ausfliesst und die Schaufeln des Rades, welche sich dieser seiner Bewegung entgegensetzen, in fast senkrechter Richtung trifft: es übt folglich auf diese Schaufeln einen Druck aus, durch welchen das Rad im Sinne des Pfeils gedreht wird.

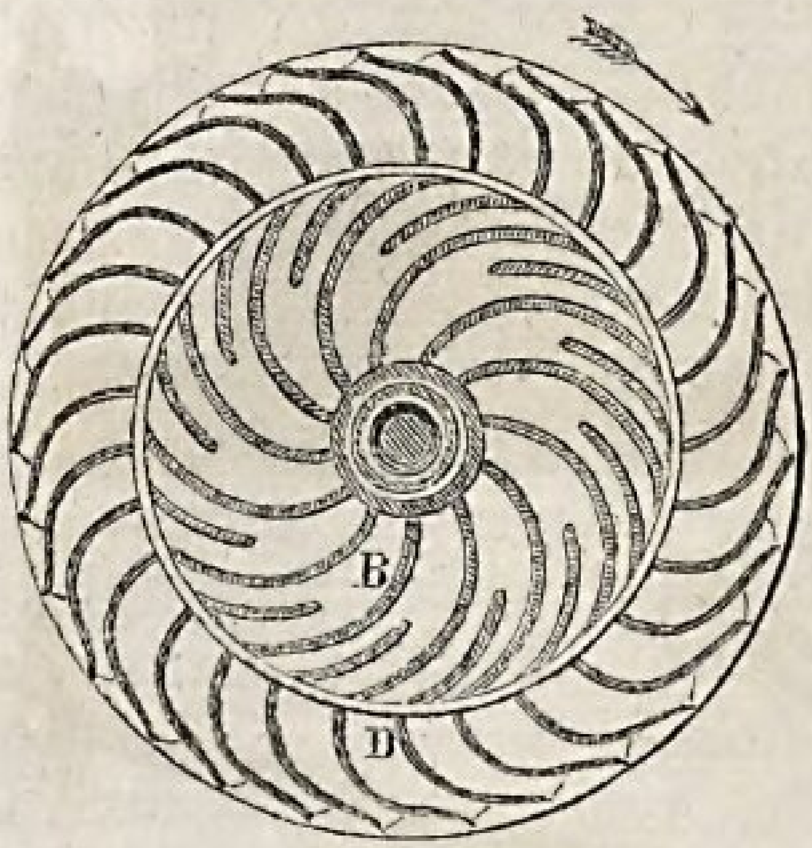


Fig. 561.

Im Innern des Behälters BB (Fig. 560) ist rings an seinem Umfange eine cylindrische Schütze *aa* angebracht. Diese Schütze ist dazu bestimmt, die Oeffnung CC, durch welche das Wasser aus dem Behälter in das Rad D strömt, mehr oder weniger zu verengen. Zu diesem Zwecke kann sie mittelst dreier vertikaler Stangen *bb*, die an ihrem oberen Theile mit Schraubengewinden versehen sind, in welche Schraubenmuttern eingreifen, nach Belieben gesenkt oder gehoben werden, einfach indem man die eben erwähnten Muttern in dem einen oder andern Sinne dreht. Die unteren Ränder dieser Schütze *aa* besitzen eine gewisse Dicke und sind abgerundet, aus einem Grunde, der aus dem, was in §. 342 gesagt wurde, klar genug ist.

Es scheint, dass die gekrümmten Schaufeln der Turbinen, welche sich der Richtung der Bewegung des Wassers beinahe senkrecht darbieten, einen Stoss von Seiten der Flüssigkeit erfahren müssten; dem ist jedoch nicht so, wenn sich die Turbine mit passender Schnelligkeit dreht. Um sich davon Rechenschaft zu geben, muss man beachten, dass die Stösse in anderer Weise vor sich gehen, wenn die Schaufeln sich bewegen, als wenn sie

still stehen. In Folge der Bewegung des Rades bewegen sich die Schaufeln vor den Flüssigkeitsfäden her. Sie können folglich eine Einwirkung von Seite der Flüssigkeit nur in Folge der relativen Geschwindigkeit erfahren, welche diese Fäden in Bezug auf sie besitzen (§. 382). Nun sind die Schaufeln so angeordnet, dass, wenn die Turbine die Geschwindigkeit besitzt, mit der sie sich gewöhnlich bewegen soll, die relative Geschwindigkeit des Wassers in Bezug auf das Rad nach der Tangente gerichtet ist, welche an das innere Ende jeder Schaufel gezogen werden kann. Es folgt daraus, dass das Wasser in das Rad eintritt, ohne einen Stoss hervorzubringen. Indem es sich längs der gekrümmten Schaufeln von innen nach aussen fortbewegt, übt es gegen jeden Punkt derselben in Folge des fortwährenden Wechsels in seiner Richtung einen gewissen Druck aus. Endlich tritt es aus dem Rade mit einer relativen Geschwindigkeit, die im entgegengesetzten Sinne der Bewegung der Schaufeln gerichtet ist; und man begreift, dass man der Turbine eine solche Bewegung machen lassen kann, dass die Geschwindigkeit an ihrem äusseren Umfange genau gleich dieser relativen Geschwindigkeit ist. Wenn diese Bedingung erfüllt ist, so tritt das Wasser aus dem Rade, ohne eine merkliche Geschwindigkeit zu besitzen, und vermischt sich so mit dem Unterwasser, in welches die Turbine taucht; es wird so zu sagen ohne Geschwindigkeit von den Schaufeln abgesetzt, die sich weiter bewegen, ohne es ferner mitzunehmen. Man sieht daraus, dass die Turbine im Grund genau so wirkt wie die Reaktionsräder, die wir im vorigen Paragraphen beschrieben haben.

Aus dem eben Gesagten geht hervor, dass die Fourneyron'sche Turbine den im §. 422 angegebenen allgemeinen Bedingungen ebenso gut genügt, wie das Ponceletrad. Aber sie hat vor diesem letzteren Rad einen bedeutenden Vortheil voraus, der darin besteht, dass sich das Wasser längs den Schaufeln immer in dem nämlichen Sinne von innen nach aussen bewegt. Bei dem unterschlächtigen Wasserrad mit gekrümmten Schaufeln tritt das Wasser in jede Schaufel ein, steigt längs der Krümmung derselben in die Höhe, um alsdann wieder herabzusteigen und an der Stelle wieder auszutreten, wo es eingetreten war; daraus folgt, dass sich die verschiedenen Theile der Wassermasse, welche jede der Schaufeln enthält, in ihrer Bewegung, sowohl in der aufsteigenden wie in der niedersteigenden, gegenseitig hindern müssen. In der Fourneyron'schen Turbine dagegen folgen die verschiedenen Wassermengen, welche nach und nach auf eine und dieselben Schaufeln wirken, da sie sich stets in dem nämlichen Sinn bewegen, auf

einander, ohne sich gegenseitig zu hindern. Zu diesem kommt noch, dass, da das Wasser zu gleicher Zeit auf alle Schaufeln der Turbine wirkt, die horizontalen Pressungen, welche es auf diese Schaufeln ausübt, die Achse des Rades weder nach der einen noch nach der anderen Seite hinüber zu drücken suchen; diese Pressungen rufen also keinerlei Reibung der Welle, weder an ihrem Zapfen noch an den Körpern hervor, welche sie in verschiedenen Punkten ihrer Höhe berühren und welche dazu bestimmt sind, sie genau in vertikaler Lage zu erhalten. Diese Umstände, welche bei einem Rad mit horizontaler Achse nicht stattfinden können, verursachen, dass die Turbine, von der wir sprechen, bessere Resultate als das Ponceletrad gibt. Die Erfahrung hat gezeigt, dass der Wirkungsgrad dieser Turbine gleich 0,75 ist und sich in gewissen Fällen sogar auf 0,80 erheben kann.

Aber die *Fourneyron*'sche Turbine bietet noch andere Vortheile von grosser Wichtigkeit, die wir nun namhaft machen wollen. Zunächst kann sie, wie Fig. 560 zeigt, mitten im Unterwasser in Thätigkeit gesetzt werden. Es folgt aus dieser Einrichtung, welche von *Fourneyron* getroffen wurde, die aber, nebenbei gesagt, nicht unbedingt erforderlich ist, 1) dass die Maschine jederzeit, bei sehr hohem sowohl wie bei niedrigem Wasserstand, ihre Thätigkeit ausüben kann, ohne dass man sich um die Höhe des Wasserspiegels im unteren Bette viel zu bekümmern brauchte; 2) dass die ganze Höhe des Gefälls nutzbar gemacht wird, was nicht der Fall ist, wenn das Rad über das Niveau des Unterwassers gestellt werden muss; 3) dass die Maschine auch zur Zeit der strengsten Winterkälte in Gang bleiben kann, weil das Wasser immer nur an der Oberfläche gefriert.

Ein anderer durch vielfache Erfahrungen bestätigter Vortheil der Turbine, mit der wir uns eben beschäftigen, besteht darin, dass man ihre Geschwindigkeit in ziemlich weiten Grenzen zu beiden Seiten der Geschwindigkeit, welche dem Maximaleffekt entspricht, sich ändern lassen kann, ohne dass ihr Wirkungsgrad bedeutend geringer wird. Dieses Resultat ist von sehr grosser Wichtigkeit in den Fällen, wo sich eine Turbine immer mit der nämlichen Geschwindigkeit bewegen soll, während doch die Höhe des Gefälls des Aufschlagwassers eine andere wird. In Wirklichkeit hängt die Geschwindigkeit einer Turbine, welche ihrem Maximaleffekt entspricht, von der Höhe des Gefälls ab; sie vermehrt und vermindert sich zugleich mit diesem Gefäll. Wenn sich folglich eine Turbine bei verschiedenen Gefällshöhen immer mit der nämlichen Geschwindigkeit bewegt, so hat sie nicht fort-

während die Geschwindigkeit, bei welcher sie die Maximalleistung gibt. Es ist also von sehr grosser Wichtigkeit, dass die Maschine, wenn sie auch mit einer Geschwindigkeit, die sich von jener speciellen unterscheidet, in Thätigkeit ist, doch Resultate liefert, welche sich von der grössten Leistung, die man von ihr erhalten kann, nicht viel entfernen.

Endlich kann die *Fourneyron*'sche Turbine bei allen Arten von Wassergefällen angewandt werden, vorausgesetzt, dass bei ihrer Construktion auf die grössere oder geringere Wassermenge, welche in ihr zur Wirkung kommen soll, sowie auf die Schnelligkeit ihrer Bewegung Rücksicht genommen ist. Folgende zwei Beispiele werden hinreichen, um keinen Zweifel darüber aufkommen zu lassen. *Fourneyron* hat bei Saint-Blaise im Schwarzwalde eine Turbine angelegt, welche durch ein Gefäll von 108 Meter Höhe in Bewegung gesetzt wird. Diese Turbine, deren Durchmesser nur $0^m,55$ ist, macht 2300 Umdrehungen in der Minute und hat 40 Pferdekräfte; ihr Wirkungsgrad ist 0,75. Auf der anderen Seite hat man durch Versuche, die an einer Turbine, welche bei Gisors aufgestellt ist, gemacht wurden, gefunden, dass der Wirkungsgrad derselben bei einem Gefälle von $1^m,15$ gleich 0,75, bei einem Gefälle von $0^m,62$ gleich 0,66 und bei einem Gefäll von $0^m,31$ noch gleich 0,60 ist. Keines der bekannten hydraulischen Räder hätte unter solchen Ausnahmsumständen so gute Resultate geben können.

§. 432. **Callon'sche Turbine.** — Bei allen Vortheilen, welche, wie wir soeben gesehen haben, die Fourneyron'sche Turbine besitzt, hat sie doch auch einen Nachtheil, welcher verursacht, dass sie nicht immer einen so grossen Theil der durch das Wassergefälle entwickelten Arbeit nutzbar macht. Wir haben gesagt, dass die Oeffnung, durch welche das Wasser aus dem Behälter tritt, um in das Rad zu gelangen, im Sinne ihrer Höhe mittelst einer cylindrischen Schütze, welche sich rings um den Behälter erstreckt, mehr oder weniger verengt werden kann, indem man diese Schütze nach Belieben hebt oder senkt. Man gibt dieser Schütze die eine oder die andere Stellung, je nachdem man gerade eine grössere oder geringere Menge von Aufschlagwasser zur Verfügung hat. Der Wasserstrahl, welcher aus dem Behälter rings um seinen Umfang entweicht, um in das Rad einzutreten, hat also je nachdem eine grössere oder geringere Dicke; er füllt somit das Rad nicht immer in der ganzen Höhe desselben aus. Der obere Theil des zwischen den Schaufeln enthaltenen Raumes bleibt indessen nicht leer; aber das Wasser,

welches sich dort befindet, besitzt nicht die Geschwindigkeit wie dasjenige, welches aus dem Behälter kommt; dadurch werden Wirbelbewegungen hervorgebracht, die Geschwindigkeitsverluste nach sich ziehen und eine Verminderung des Nutzeffekts der Maschine verursachen. Desshalb hat auch *Fourneyron* sein Rad im Sinne seiner Höhe mittelst horizontaler Scheidewände, welche man in Fig. 560 sieht, in mehrere Abtheilungen getheilt. Aber diese Scheidewände können natürlich den bezeichneten Nachtheil nicht vollständig beseitigen.

Aus diesem Grunde hat *Ch. Callon* ein anderes Mittel erdacht, um die Menge des von der Turbine verbrauchten Wassers zu reguliren. Dieses Mittel besteht darin, dass er die eine Schütze *Fourneyron's* durch eine grosse Zahl kleiner besonderer Schützen ersetzt hat, welche den verschiedenen Theilen der Oeffnung entsprechen, durch welche das Wasser aus dem Behälter in das Rad tritt. Man begreift, dass man mittelst dieser Modification die Wassermenge, welche aus dem Reservoir fliesst, vermindern kann, ohne dem Strahl des Wassers eine geringere Dicke geben zu müssen. Man darf nur einige von den kleinen Schützen, die man so auswählt, dass sie regelmässig um den Umfang des Behälters vertheilt liegen, vollständig verschliessen und alle die anderen dagegen ganz offen lassen. Auf diese Weise wird der Nachtheil, welchen wir von der *Fourneyron*'schen Turbine angegeben haben, zwar beseitigt, aber er wird zugleich durch einen anderen ersetzt, welcher darin besteht, dass die verschiedenen Theile des Rades abwechselnd vor geöffneten und geschlossenen Schützen vorbeigehen müssen. In dem Augenblick, wo der Zwischenraum zwischen zwei Schaufeln gegenüber einer geschlossenen Schütze ankommt, kann das darin enthaltene Wasser, welches eine ziemlich grosse Geschwindigkeit besitzt, seine Bewegung nur fortsetzen, indem es einem luftleeren Raum hinter sich lässt, wodurch eine plötzliche Verminderung seiner Geschwindigkeit und folglich ein Verlust von Arbeit hervorgebracht wird.

§. 433. **Fontaine'sche Turbine.** — *Fontaine* in Chartres hat der Turbine eine andere Einrichtung gegeben als diejenige, welche *Fourneyron* angenommen hat. Anstatt das Aufschlagwasser in einem Cylinder, der bis zur Mitte des Rades hinabreicht, niedergehen, an dem ganzen Umfang dieses Cylinders ausfliessen und von innen nach aussen durch das Rad gehen zu lassen, hat er die Einrichtung getroffen, dass das Wasser aus dem Reservoir A (Fig. 562) durch eine ringförmige Oeffnung, die in dem Boden desselben angebracht ist, ausfliessen und auf das Rad C C, welches

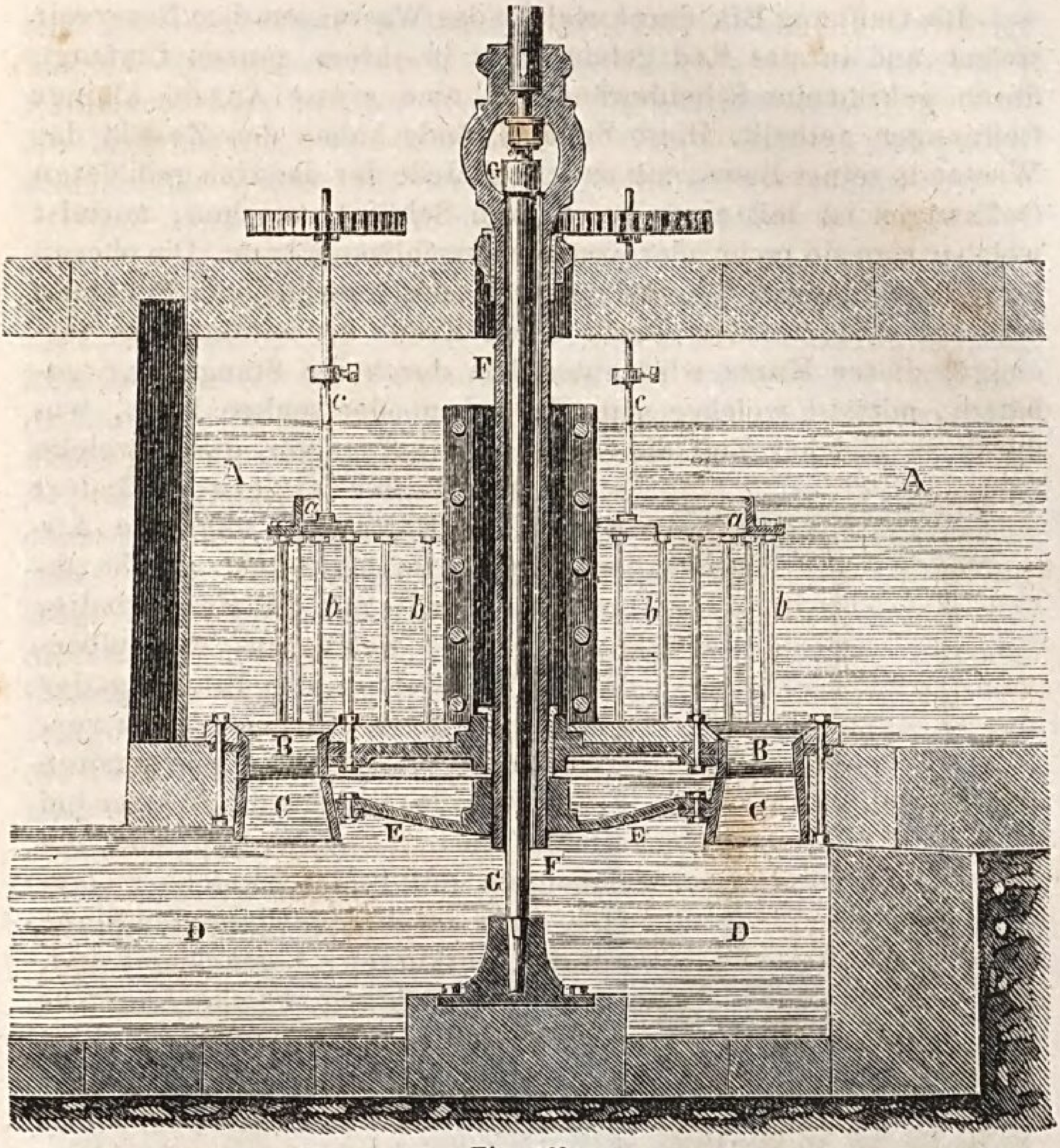


Fig. 562.

unter diese ringförmige Oeffnung gestellt ist, von oben nach unten wirken kann. Das Rad ist durch eine Art eisernen Teller E E mit einer vertikalen Welle F F verbunden, welcher es seine Rotationsbewegung mittheilt. Diese Welle ist hohl und umschliesst eine zweite Achse G G, welche sich fest gegen den Boden des unteren Bettes stützt. Diese letztere Achse dreht sich nicht mit dem Rade; sie trägt an ihrem oberen Ende, welches die Pfanne bildet, einen Zapfen, der fest mit der Welle F F des Rades verbunden ist. Durch diese Einrichtung ist die Turbine so zu sagen aufgehängt, und da sich der Zapfen ausser dem Wasser befindet, so kann man denselben leicht in einem Zustande erhalten, wo die Reibung und die Abnützung möglichst gering sind.

Die Oeffnung BB, durch welche das Wasser aus dem Reservoir strömt und in das Rad gelangt, ist in ihrem ganzen Umfange durch gekrümmte Scheidewände in eine grosse Anzahl kleiner Oeffnungen getheilt. Diese Scheidewände haben den Zweck, das Wasser in seiner Bewegung zu leiten. Jede der dadurch gebildeten Oeffnungen ist mit einer besonderen Schütze versehen, mittelst welcher man sie mehr oder weniger verschliessen kann. Die oberen Enden der Stangen *b*, *b*, welche an diesen verschiedenen Schützen befestigt sind, werden durch einen Kranz *aa* miteinander vereinigt; dieser Kranz wird ausserdem durch die Stangen *c*, *c* gehalten, mittelst welcher man ihn heben oder senken kann, wodurch zu gleicher Zeit die Grösse der Oeffnungen, durch welche sich das Wasser ergiesst, geändert wird. Die Figur 563 zeigt die Anordnung der Schützen *d*, *d*, welche abgerundet sind, um die Geschwindigkeitsverluste, welche aus dem plötzlichen Wechsel in der Richtung der Flüssigkeitsfäden entspringen, zu vermindern; *e*, *e* sind die gekrümmten Scheidewände, welche das Wasser bei seinem Austritt leiten; *f*, *f* sind die Schaufeln des Rades, welche gleichfalls, aber im entgegengesetzten Sinne mit den Leitkurven *e*, *e*, gekrümmt sind.

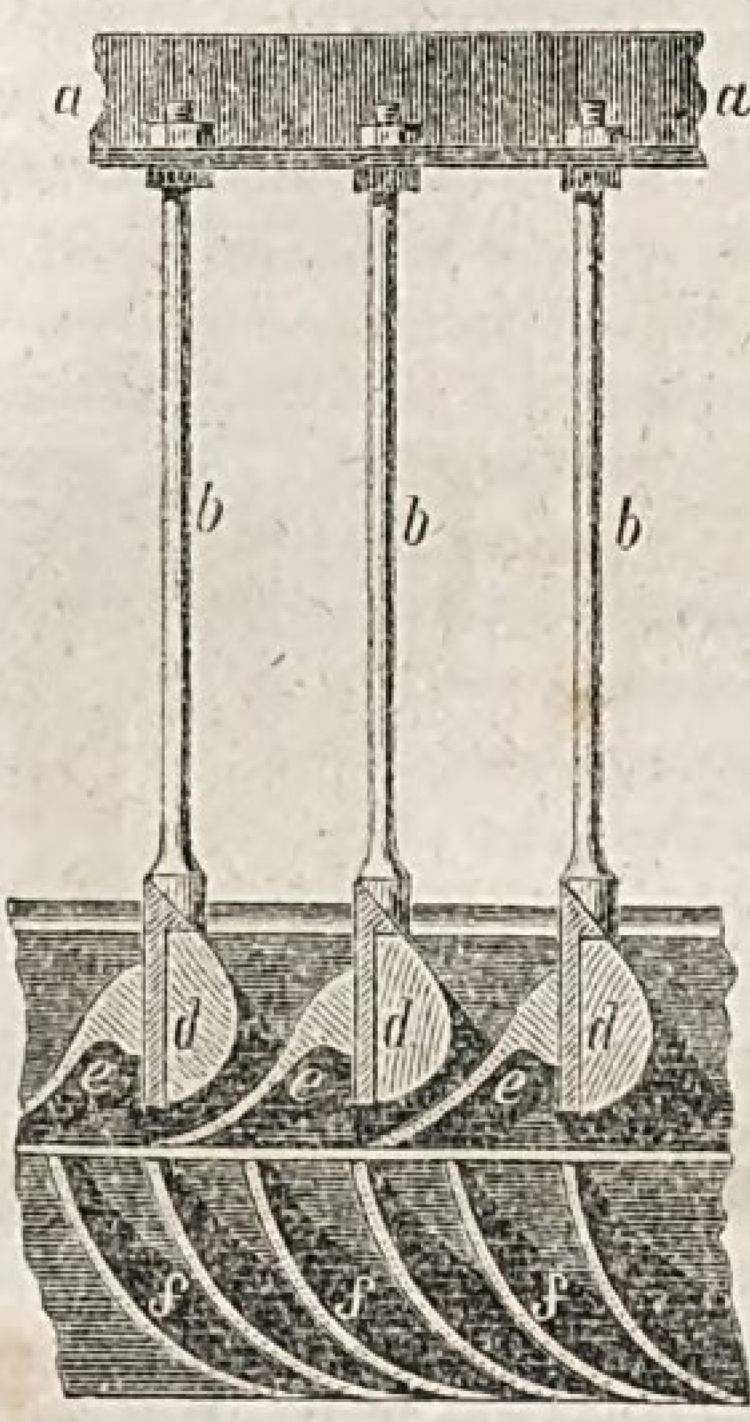


Fig. 563.

Die Einrichtung, welche *Fontaine* seinen Schützen gegeben hat, beseitigt zum grössten Theil die Nachtheile, welche wir bei der Fourneyron'schen Turbine bezeichnet haben, und welche eine Verminderung des Wirkungsgrades der Maschine veranlassen, wenn ihr nicht das ganze Wasser geliefert wird, das sie zu verbrauchen im Stande ist. Bei hinreichend geöffneten Schützen geben übrigens beide Arten von Turbinen gleich gute Resultate.

§. 434. **Henschel-Jonval-Koechlin'sche Turbine.** — Die Turbinen mit denen wir uns bisher beschäftigten, haben für etwa an denselben vorzunehmenden Reparaturen eine unbequeme Stellung. Man kann zu dem Rade nur dann gelangen, wenn man zuvor durch irgend ein Mittel die Oberfläche des Unterwassers, in welches die Turbine ganz eintaucht, oder über welchem sie

sich nur in geringer Entfernung befindet, bedeutend erniedrigt hat. Zu diesem Zweck stellt man gewöhnlich einen provisorischen Fangdamm her, welcher den Theil des unteren Bettes, wo sich das Rad befindet, von dem übrigen Wasser isolirt, und pumpt alsdann das Wasser aus dem so abgeschlossenen Raume aus.

Die *Henschel*'sche Turbine ist eine Erfindung des Oberbergraths *Henschel* in Kassel; sie wurde später von *Jonval* verbessert und in neuester Zeit durch *Koechlin* in Mühlhausen noch mehr vervollkommnet; ihre von den bisherigen verschiedene Einrichtung hat den Zweck, die Schwierigkeiten der Besichtigung und Reparatur, welche wir bei den anderen Turbinen soeben bezeichnet haben, zu beseitigen. Das Princip, nach welchem sie angelegt ist, ist folgendes. Denken wir uns, dass das Wasser aus dem oberen Bette in das untere durch einen vertikalen Cylinder geleitet werde, der sich nach diesen beiden Betten hin öffnet (Fig. 564); die in Folge des Durchflusses des Wassers durch diesen Cylinder entwickelte Arbeit kann man nutzbar machen, indem man an seinem unteren Theil eine solche Turbine wie diejenige, die wir eben beschrieben haben, aufstellt. Aber anstatt die Turbine an den tiefsten Punkt dieses Gefälles zu setzen, kann man sie in irgend einem Punkte der Höhe des Cylinders anbringen, vorausgesetzt, dass das Wasser, nachdem es das Rad verlassen hat und hierauf den unteren Theil des Cylinders zwischen dem Rad und dem Unterwasser durchläuft, erst dann in direkte Verbindung mit der Atmosphäre kommt, wenn es in dem unteren Bette angekommen ist. Man sieht in der That, dass man das, was man auf der einen Seite durch das Höherstellen der Turbine und der dar-

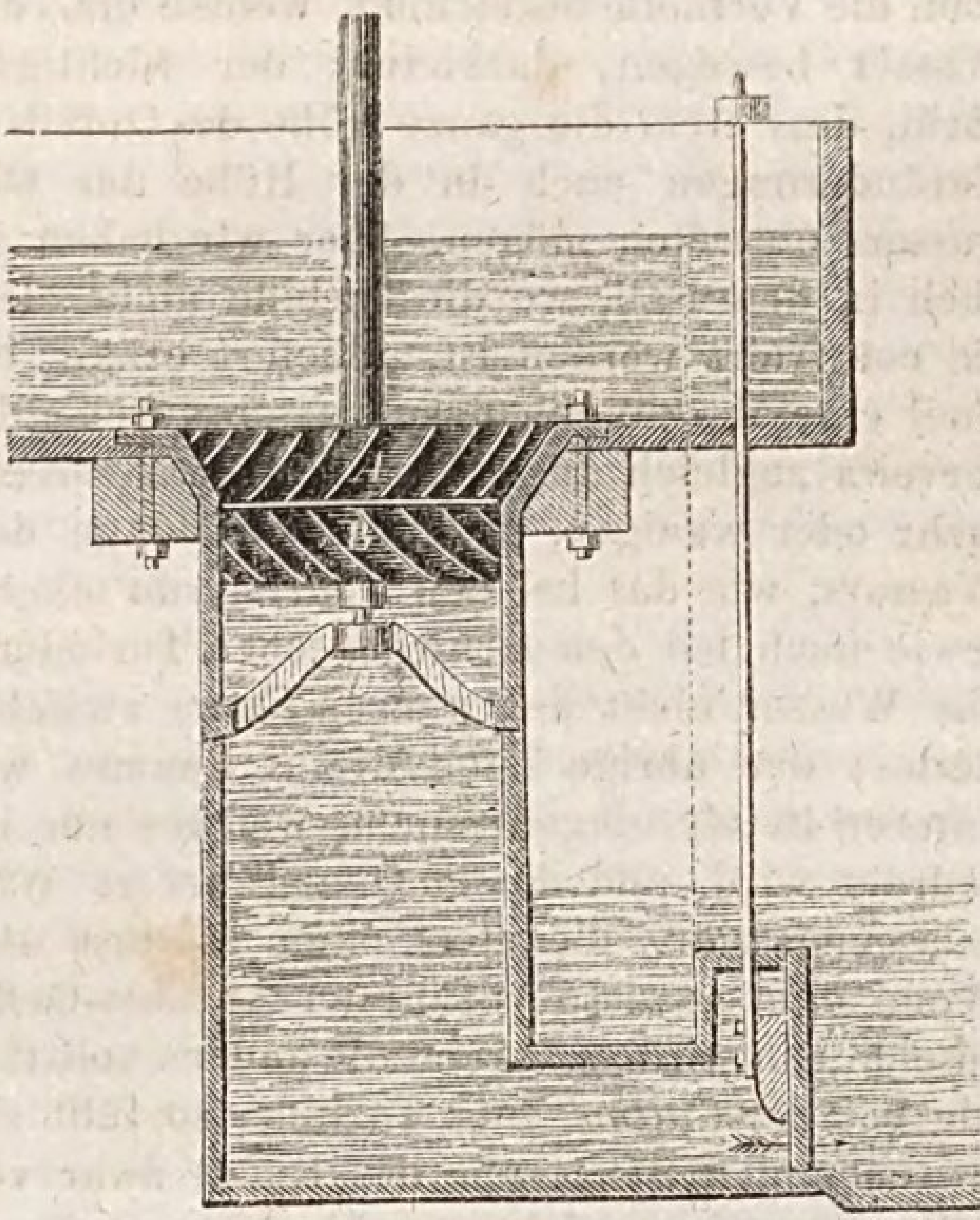


Fig. 564.

aus folgenden Verringerung der Höhe der Oberfläche des Oberwassers über dem Rade an Druckkraft verliert, auf der anderen Seite durch das Saugen, welches in dem unter dem Rad gelegenen Theil des Cylinders hervorgebracht wird, wieder gewinnt, da dieses Saugen um so stärker wirkt, je höher das Rad über dem Niveau des Unterwassers steht; die Kraft, mit welcher das, durch das Rad fliessende Wasser auf dieses wirkt, entspricht in jeder Lage desselben dem Höhenabstande zwischen dem oberen und unteren Wasserspiegel. Man begreift jetzt, dass man der Maschine eine solche Lage geben kann, welche die Besichtigung und Reparatur derselben viel leichter bewerkstelligen lässt; es reicht hin, das Aufschlagwasser von dem Cylinder, welcher die Turbine enthält, abzusperren, um diesen Cylinder vollständig zu leeren und das Rad trocken zu legen.

Die *Henschel*'sche Turbine, in welcher das Wasser wie in der *Fontaine*'schen gleichfalls von oben nach unten, und nicht horizontal wie bei den anderen Maschinen dieser Art, wirkt, liefert, wenn sie nur auch unter den Umständen, für welche sie construirt worden ist, wirkt, ebenfalls sehr günstige Resultate.

§. 435. **Hydropneumatische Turbinen.** — Wir haben oben die Vortheile bezeichnet, welche die Turbinen, die sich unter Wasser bewegen, darbieten; der wichtigste derselben besteht darin, dass stets die ganze Höhe des Gefälls benützt wird, welche Veränderungen auch in der Höhe der Oberfläche des Unterwassers eintreten mögen. Aber wir haben gesehen, dass daraus auch in dem Fall, wo die Turbine nicht alles Wasser, für welches sie construirt worden ist, geliefert erhält, ein bedeutender Nachtheil entsteht. Wenn das Wasser durch alle Oeffnungen des Reservoirs zugleich ausströmt, und man verengert diese Oeffnungen mehr oder weniger, je nach der Menge des zu verbrauchenden Wassers, wie das bei den *Fourneyron*'schen und *Fontaine*'schen, sowie auch bei den *Henschel*'schen Turbinen geschieht, so erfüllt das Wasser nicht den ganzen Raum zwischen den Schaufeln des Rades; der übrige Theil dieses Raumes wird vom Wasser des unteren Bettes eingenommen, welches nur mit dem Rade herumgedreht wird, und dessen Gegenwart zu Wirbelbewegungen Veranlassung gibt, die stets einen Verlust an Arbeit hervorrufen. Wenn eine gewisse Anzahl der Ausfluss-Oeffnungen des Behälters geschlossen wird, während die andern vollständig geöffnet bleiben, wie bei der *Callon*'schen Turbine, so füllt sich der Zwischenraum zwischen den Schaufeln des Rades zwar vollständig, wenn dieselben vor einer nicht geschlossenen Oeffnung vorbeigehen, aber

wenn diese Zwischenräume vor einer geschlossenen Oeffnung vorbei kommen, so erfährt das Wasser darin in Folge dessen, dass seine Bewegung einen luftleeren Raum hinter ihm hervorzubringen sucht, eine plötzliche Verzögerung. Diese Nachtheile sind nicht vorhanden, wenn sich die Maschine ausser Wasser bewegt, selbst wenn dieselbe so eingerichtet wäre, dass die Zwischenräume zwischen ihren Schaufeln niemals vollständig mit dem Wasser, welches sie durchdringt, gefüllt wären. Der übrige Theil dieser Räume würde in diesem Falle durch Luft eingenommen werden, welche mit der äusseren Luft frei in Verbindung stünde und deren Gegenwart die Bewegung des Wassers in den Höhlungen zwischen den gekrümmten Schaufeln nicht beeinträchtigen würde.

Um die Vortheile des Ganges unter Wasser mit den Vortheilen des Ganges in der Luft zu vereinigen, kam *Girard* auf den Gedanken, die Turbinen in comprimirter Luft in Bewegung zu setzen. Denken wir uns, dass eine Turbine unter dem Spiegel des Unterwassers angebracht sei und dass sie von einer Art Glocke, welche in das Wasser taucht und deren Ränder etwas tiefer als der unterste Theil des Rades liegen, bedeckt werde. Wenn man in diese Glocke Luft hineindrückt, so senkt sich das Niveau des Wassers in derselben mehr und mehr; aber von dem Augenblick an, wo es bis zu dem Rande der Glocke herabgesunken ist, entweichen neue Quantitäten zugeführter Luft unter diesem Rande, um durch das Unterwasser in die freie Luft emporzusteigen, ohne dass sie den Wasserpiegel in der Glocke noch weiter herabdrücken können. Mittelst dieser Einrichtung ist das Rad nicht in Wasser getaucht, sondern befindet sich in geringer Entfernung über dem Niveau des umgebenden Wassers, und zwar stets in derselben Höhe über demselben, welches auch die Höhe des Unterwassers ist. Darin besteht das Princip der hydropneumatischen Turbinen.

Man gibt sich über die Art und Weise, auf welche das Wasser in einer solchen Turbine wirkt, leicht Rechenschaft, wenn man sich dessen erinnert, was wir für den Ausfluss einer Flüssigkeit durch eine Oeffnung für den Fall gesagt haben, wo der Luftdruck auf die Oeffnung grösser ist als auf die freie Oberfläche der Flüssigkeit im Reservoir (§. 339). Wenn das Niveau des Unterwassers 3 Decimeter über dem Rande der Glocke, welche die Turbine enthält, gelegen ist, so wird der Ueberschuss des Druckes der in dieser Glocke eingeschlossenen Luft über den der äusseren Luft durch eine Wassersäule von 3 Decimeter Höhe gemessen. Der Ausfluss des Wassers des Behälters durch die Tur-

bine und folglich in die comprimirte Luft der Glocke geschieht also auf dieselbe Weise, als wenn diese Luft nicht comprimirt und das Niveau des Oberwassers um 3 Decimeter niedriger wäre. Es entspricht folglich der Ausfluss der Flüssigkeit stets der Höhe des Gefälls, d. h. dem Niveau-Unterschiede des Ober- und Unterwassers. Die Anwendung der Glocke mit comprimirter Luft führt also zu denselben Resultaten, als wenn man, das Rad an dem Platze, wo es sich befindet, ruhig stehen lassend, das Ober- und Unterwasser zugleich um die nämliche Grösse senken würde, bis das Niveau des letzteren unmittelbar unter das Rad zu liegen käme. Man sieht daraus, dass eine hydropneumatische Turbine die Vortheile des Gangs in der Luft mit dem verbindet, so viel als möglich das ganze Gefäll nutzbar zu machen.

Bei der Construktion der hydropneumatischen Turbine hat man nicht nöthig, solche Dimensionen anzuwenden, dass die Zwischenräume zwischen den Schaufeln des Rades vollständig mit Flüssigkeit gefüllt sind, wenn die Turbine die grösste Wassermenge, welche ihr geliefert werden kann, verbraucht. Es ist selbst besser, wenn ein Theil dieser Zwischenräume immer von Luft eingenommen wird, welche mit der umgebenden Luft frei communicirt. Daraus folgt, dass man in dem Fall, wo man nur eine geringe Menge Aufschlagwasser zur Verfügung hat, dem Rade grössere Dimensionen geben kann als ohne dieses der Fall wäre, und dass man es folglich weniger schnell drehen lassen kann, was immer vortheilhaft ist. Alsdann ist auch die Anwendung der einzelnen Schützen *Callon's*, sei es, dass diese an *Fourneyron'*schen oder an *Fontaine*'schen Turbinen angebracht würden, der Einrichtung vorzuziehen, die darin besteht, die Oeffnungen, durch welche das Wasser aus dem Reservoir in das Rad tritt, mehr oder weniger zu verengern, aber keine derselben vollständig zu verschliessen. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die auf diese Art angelegten Turbinen nahezu einen und den nämlichen Wirkungsgrad (0,75) geben, welches auch die Menge des Aufschlagswassers ist; und dies ist ein Resultat von der grössten Wichtigkeit.

Es bleibt uns jetzt nur noch übrig, anzugeben, auf welche Art man die Luft in der Glocke, welche das Rad bedeckt, verdichtet. Man bedient sich zu diesem Zwecke einer Luft-Druckpumpe, welche die Turbine selbst während der ganzen Zeit ihres Ganges in Bewegung setzt. Die Luftmengen, welche auf diese Weise fortwährend in die Glocke geführt werden, ersetzen die Verluste, welche von den etwa vorhandenen Ritzen und Spalten, sowie davon herrühren, dass das Wasser stets etwas Luft mit

sich fortreisst; ausserdem liefert die Pumpe immer einen Ueberschuss an Luft, welcher unter dem Rande der Glocke entweicht, sodass man sicher ist, dass das Niveau des Wassers zunächst der Turbine immer in der Höhe dieses Randes steht.

Girard hat vorgeschlagen, dasselbe System auch auf die Wasserräder mit horizontaler Achse anzuwenden, um das zu tiefe Eintauchen derselben zu Zeiten von Hochwasser zu vermeiden.

§. 436. **Allgemeine Betrachtungen über die Anlage eines Wasserrads.** — Wenn man, um die Kraft eines Wassergefälles nutzbar zu machen, ein Wasserrad anlegen will, so muss man vor Allem unter den verschiedenen Arten dieser Räder dasjenige herauswählen, welches den Umständen, unter denen es aufgestellt werden soll, am besten entspricht. Bei dieser Wahl sind es Momente von verschiedener Natur, welche in Betracht gezogen werden müssen: Die grössere oder geringere Einfachheit des Rades, sowie der baulichen Einrichtungen, welche seine Anlage erfordert; die Leichtigkeit der Vornahme von Reparaturen, welche von Zeit zu Zeit an Maschinen dieser Art zu machen sind; die Natur des Gefälles und die Aenderungen, welche dessen Kraft in den verschiedenen Jahreszeiten erfährt; die grössere oder geringere Sorgfalt, welche man darauf verwenden muss, den grösstmöglichsten Theil der Kraft dieses Gefälls nutzbar zu machen. Dies sind die wichtigsten Motive, welche dazu führen können, dieses oder jenes System der hydraulischen Motoren anzuwenden.

Wenn man seine Wahl getroffen hat, so weiss man auch, welcher Bruchtheil des Totaleffekts des Gefälles durch das Rad, welches man anwenden will, nutzbar gemacht wird. Dieser ist z. B. 0,75, wenn es sich um ein Zellenrad oder um eine Turbine handelt, oder 0,56 bei einem unterschlächtigen Rade mit krummen Schaufeln, oder nur 0,25 bei einem unterschlächtigen Rade mit ebenen Schaufeln.

Man kann also, nachdem man die Totalleistung einer Wasserkraft kennen gelernt hat, die Zahl der Pferdekräfte berechnen, welche das Wasserrad gibt, und darnach die Zahl und Dimensionen der von der Kraftmaschine zu treibenden Arbeitsmaschinen, wie z. B. der Pumpen, die das Wasser auf eine gewisse Höhe heben sollen, oder der Mahlgänge einer Mühle, oder der Spinn- und Webmaschinen etc., einrichten. Zu diesem Zweck muss man die Menge der Arbeit, welche an jeder dieser verschiedenen Arbeitsmaschinen durch eine Pferdekraft ausgeführt werden kann, aus Erfahrung wissen.

Die Höhe des Gefälls und die Natur des Rades, welches man angenommen hat, bestimmen die Zahl der Umdrehungen, welche dieses Rad in einer gegebenen Zeit machen muss, damit man den Maximaleffekt erhält. Man muss folglich zwischen der Welle des Rades und den Mechanismen, welche es bewegen soll, eine solche Verbindung herstellen, dass sich diese Mechanismen mit derjenigen Geschwindigkeit, welche für die Arbeit, die sie auszuführen haben, am günstigsten ist, bewegen, wenn das Rad diejenige Bewegung besitzt, bei welcher sein Wirkungsgrad der grösstmöglichste ist. Man bedient sich zu diesem Zwecke der Verzahnungen (§. 85) oder der Riemen ohne Ende (§. 84).

Nach der Geschwindigkeit endlich, welche das Rad annehmen muss, und nach der Menge des Aufschlagwassers, welches ihm das Gefäll in einer gegebenen Zeit liefert, bestimmt man die Dimensionen der Schaufeln oder Zellen, auf welche die Flüssigkeit wirken soll.

Wenn das Rad construirt und aufgestellt ist, und wenn man es mit den Maschinen, welche es bewegen soll, in Verbindung gesetzt hat, so handelt es sich nur noch darum, die Schützen, welche dem Aufschlagwasser aus dem oberen Bette herabzufliessen gestatten, zu öffnen, damit jenes seine Wirkung auf das Rad ausüben und dasselbe in Bewegung setzen kann. Es ist klar, dass, je nachdem man dem Rade eine grössere und grössere Menge Wasser zufliessen lässt, die Bewegung desselben immer schneller und schneller wird. Man begreift also, dass man ihm auf diese Weise die Geschwindigkeit geben kann, welche seinem Maximaleffekt entspricht; und wenn die Versuche, auf welche man die Anlage des ganzen Etablissements gegründet hat, richtig und genau waren, so muss auf diese Weise genau die Wassermenge verbraucht werden, welche das Gefälle ohne Unterbrechung zu liefern im Stande ist.

§. 437. **Einfach wirkende Wassersäulenmaschine.** In den meisten Fällen bedient man sich der Wasserräder, um die Kraft eines Wassergefälles nutzbar zu machen; indessen gibt es auch Ausnahmszustände, in welchen man zu anderen Mitteln seine Zuflucht nimmt. Wenn man ein Gefäll von sehr grosser Höhe zur Verfügung hat, das nur eine geringe Menge Wasser liefert, so kann man dieses Gefälle benützen, um einen Kolben, der sich in einem Cylinder bewegt, eine hin- und hergehende Bewegung zu geben; und indem man dann diese hin- und hergehende Bewegung auf verschiedene Mechanismen überträgt, erzeugt sie eine gewisse Menge Nutzarbeit.

Die Kraftmaschinen, bei welchen auf diese Weise die Kraft des Wassers auf einen Kolben wirkt, welcher sich in Folge dieser Wirkung bald in dem einen, bald in dem entgegengesetzten Sinne bewegt, werden mit dem Namen Wassersäulenmaschinen bezeichnet. Eine solche Maschine heisst einfach wirkend, wenn das Wasser den Kolben nur in dem einen Sinne bewegt und seine Bewegung im entgegengesetzten Sinne durch sein eigenes Gewicht oder durch das Gewicht verschiedener Stücke, welche mit ihm verbunden sind, hervorgebracht wird; doppelt wirkend heisst die Maschine dagegen, wenn das Wasser fortwährend auf den Kolben wirkt, sowohl bei seinem Hin- als auch bei seinem Hergang.

Wir nehmen als Beispiel für die einfach wirkenden Wassersäulenmaschinen die schöne Maschine von *Juncker*, welche in dem Bergwerke von Huelgoat in der Bretagne aufgestellt ist. Die Figur 565 gibt einen Durchschnitt derselben, welcher alle Einzelheiten ihrer Einrichtung zeigt. Ein Kolben A befindet sich in einem Cylinder BB, welchen er in seiner ganzen Länge durchlaufen kann. Dieser Cylinder ist oben offen und unten geschlossen; die Kolbenstange geht luft- und wasserdicht durch den Boden des Cylinders nach abwärts. Das Wasser, welches die Maschine bewegen und das zu diesem Behufe mit dem aus der Höhe des Gefälles entspringenden Druck auf den Kolben A wirken soll, wird durch eine Röhre C zugeführt, welche aus dem oberen Reservoir kommt und in der Maschine selbst endigt. Eine Oeffnung D, die unten an dem Cylinder BB angebracht ist, gestattet dem Aufschlagwasser, in diesen Cylinder zu dringen, seinen Druck auf den Kolben A auszuüben und ihn im Cylinder in die Höhe steigen zu machen. Dieselbe Oeffnung lässt hierauf das im Cylinder BB enthaltene Wasser wieder ausfliessen und gestattet auf diese Weise dem Kolben A wieder abwärts zu gehen, wenn man ihre Verbindung mit der Röhre C unterbricht und sie frei mit der atmosphärischen Luft communiciren lässt.

Damit folglich der Kolben A in dem Cylinder BB eine hin- und hergehende Bewegung annehmen kann, muss die Oeffnung D abwechselnd mit der Einfallröhre C des Kraftwassers und mit der Atmosphäre in Verbindung gesetzt werden; dieses Geschäft verrichtet der Steuerungsapparat, welchen man zur Linken des Cylinders BB sieht. Dieser Apparat besteht im Wesentlichen aus zwei Kolben E, F, die an der nämlichen Stange befestigt sind und sich mit einander in dem Cylinder, welcher sie enthält, bewegen können. Diese beiden Kolben haben in der Fig. 565 die tiefste

Stellung, welche sie einnehmen können; die Fig. 566 dagegen, welche den Steuerungsapparat allein nochmals darstellt, zeigt sie in ihrer höchsten Stellung. In der einen wie in der anderen dieser beiden Stellungen steht das Kraftwasser, welches durch die Röhre C kommt, mit dem Raum zwischen den beiden Kolben E, F in Verbindung. Aber in der ersten, Fig. 565, steht der Kolben E unter der Oeffnung D und das

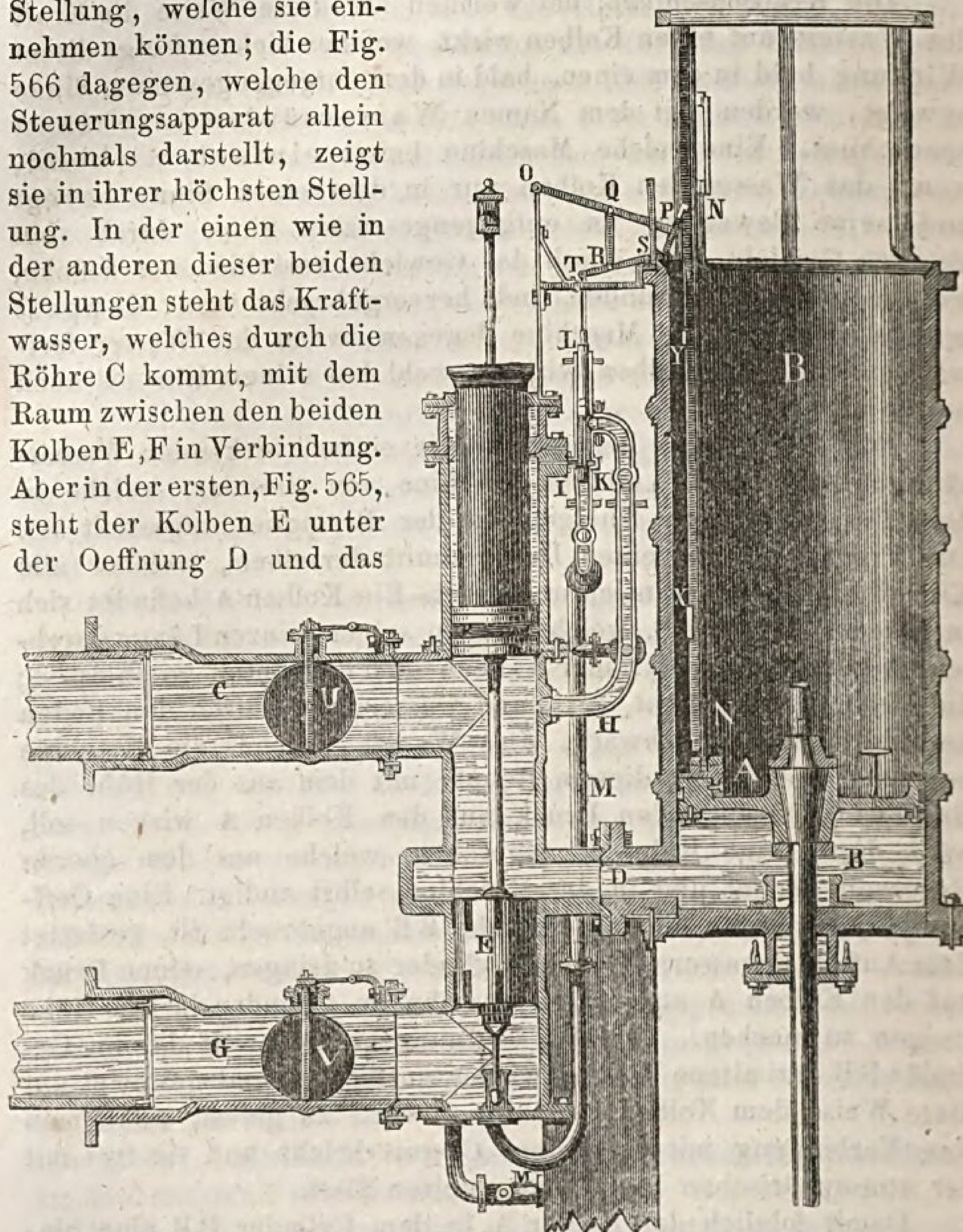


Fig. 565. (Maassstab 22 : 1000.)

Kraftwasser kann folglich auf den Kolben A drücken und ihn emporsteigen machen; während in der zweiten, Fig. 566, der Kolben E den Durchgang des Kraftwassers unterbricht und dagegen dem Wasser, welches beim Emporsteigen des Kolbens unter denselben gelangt ist, gestattet, durch das Austragrohr G auszufliessen und den Kolben wieder niedergehen zu lassen. Es bleibt uns also noch übrig, zu zeigen, wie die beiden Kolben E, F

eine hin- und hergehende Bewegung erhalten, in Folge deren die Oeffnung D abwechselnd mit dem Rohre C und mit dem Rohre G in Verbindung gesetzt wird.

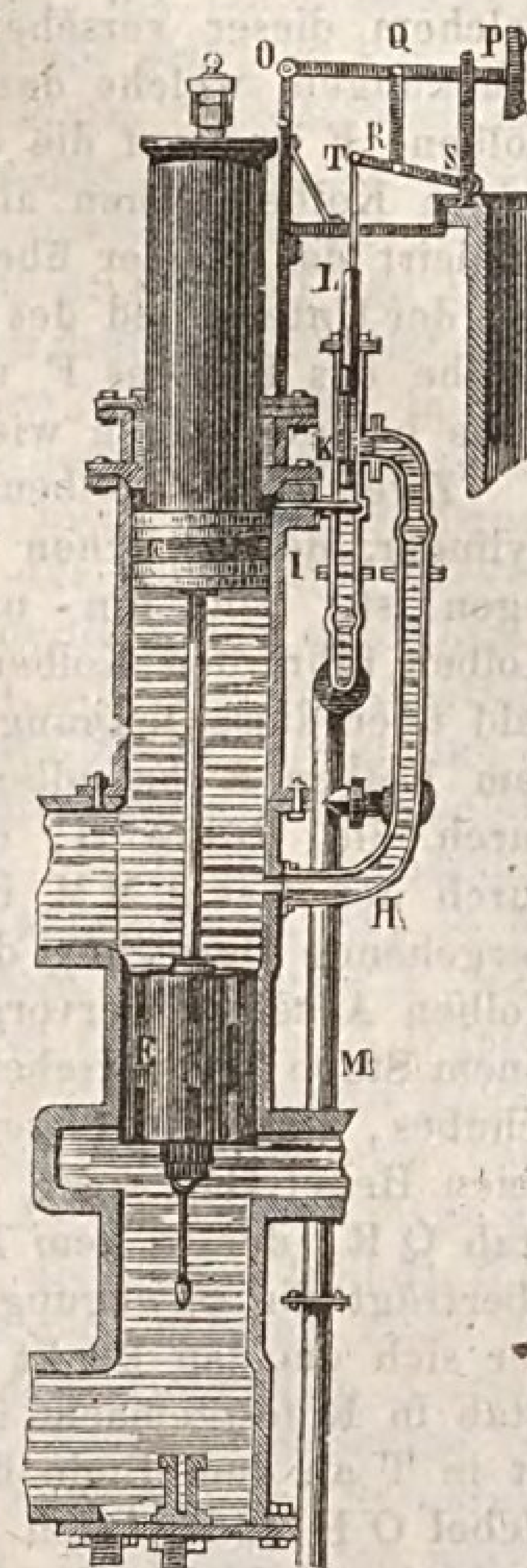


Fig. 566.

Der Durchmesser des Kolbens F ist etwas grösser als der des Kolbens E; das Aufschlagwasser, das in dem Raum zwischen beiden Kolben immer freien Zutritt hat, übt folglich auf die untere Fläche des ersteren einen grösseren Druck aus als auf die obere Fläche des zweiten; in Folge dessen suchen die beiden Kolben mit einer Kraft gleich der Differenz zwischen diesen beiden Drückungen fortwährend in die Höhe zu steigen. Dies geschieht in der That, so lange keine andere Wirkung zu der, welche wir soeben bezeichnet haben, hinzukommt, und auf diese Weise gehen die Kolben E, F aus der in Fig. 565 gezeichneten Lage in die der Fig. 566 über. Um die entgegengesetzte Bewegung hervorzubringen, hat man an dem Cylinder, in welchem sich die beiden Kolben E, F bewegen, eine kleine Röhre H angebracht, welche sich aufwärts biegt und durch die kleine Oeffnung I mit dem Raum über dem Kolben F communicirt. Indem das Kraftwasser diese soeben bezeichneten Kanäle durchdringt, drückt es oben auf den Kolben F, und damit der so hervorgebrachte Druck nicht zu gross wird, hat man den Kolben F mit einem sich nach oben erstreckenden hohlen Cylinder versehen, der mittelst einer Stopfbüchse durch den Deckel des Steuerungscylinders hindurchgeht, sodass das durch die Oeffnung I zugeführte Wasser nur auf die ringförmige Fläche, welche diesen hohlen Cylinder umgibt, drücken kann. Ein besonderer Mechanismus, von dem wir sogleich sprechen werden, setzt die Oeffnung I abwechselnd mit der Röhre H, welche das Aufschlagwasser zuführt, und mit der Röhre MM, welche in dem Austragrohr G endigt, in Verbindung. In dem ersten Fall überwiegt der Druck, mit welchem das Aufschlagwasser auf die obere Fläche des Kolbens F rings um den hohlen Cylinder, mit

welchem dieser versehen ist, drückt, über die Resultante der Drückungen, welche dasselbe Wasser auf die untere Fläche des Kolbens F und auf die obere Fläche des Kolbens E ausübt; die beiden Kolben gehen also abwärts. In dem zweiten Fall communicirt das Wasser über dem Kolben F mit dem Austragrohr G, und der Unterschied des Druckes des Kraftwassers auf die untere Fläche des Kolbens F und auf die obere des Kolbens E hebt diese beiden Kolben wieder in die Höhe.

Zwei kleine Kolben K, L befinden sich in einem kleinen Cylinder, der zwischen der Röhre H und der Oeffnung I gelegen ist. Eine hin- und hergehende Bewegung dieser beiden Kolben führt den Kolben K bald unter die Oeffnung I (Fig. 565), bald über diese Oeffnung (Fig. 566), und dadurch wird der über dem Kolben F befindliche Raum einmal mit dem Kraftwasser durch die Röhre H, das anderemal mit dem Austragrohr G durch den Kanal MM in Verbindung gesetzt. Diese hin- und hergehende Bewegung der kleinen Kolben K, L wird durch den Kolben A selbst hervorgebracht. Zu diesem Zwecke ist er mit einem Stabe NN versehen, welcher am Ende eines jeden Kolbenschubes, eines aufsteigenden sowohl als eines absteigenden, auf einen Hebel OP wirkt, der um den Punkt O beweglich ist. Ein Stab QR, der in dem Punkte Q an diesem Hebel befestigt ist, überträgt die Bewegung desselben auf einen zweiten Hebel ST, der sich um den Punkt S bewegen kann und an welchem jener Stab in R festgemacht ist. Die Stange der beiden Kolben K, L ist in T an dem Ende dieses letzteren Hebels ST befestigt. Der Hebel OP endigt sich in einem Bogen P, welcher an seinen Enden zwei kleine Daumen trägt. Ausserdem ist der Stab NN, welcher mit dem Kolben steigt und fällt, mit zwei kleinen Ansätzen X, Y versehen, von denen der eine auf seiner vorderen, der andere auf seiner hinteren Seite festgemacht ist. Diese Ansätze begegnen, jeder zu seiner Zeit, einem der Daumen des Bogens P und setzen auf diese Weise die beiden Hebel OP, ST und die Kolben K, L in Bewegung.

Die Fig. 565 zeigt die Maschine in der Lage, welche die verschiedenen Stücke einnehmen, wenn der Kolben A unter der Wirkung des Kraftwassers in die Höhe steigt; die Kolben K und L nehmen ihre tiefste Stellung ein; das Aufschlagwasser steht durch die Röhre H und die Oeffnung I mit dem Raum über dem Kolben F in Verbindung; es drückt folglich auf die obere Fläche dieses Kolbens und hält so die beiden Kolben E, F gleichfalls in ihrer tiefsten Stellung; der Treibkolben A steht

also unter der Wirkung der Wassersäule, die bei C und D in den Treibcylinder hereinkommt, und erhebt sich, so lange die Kolben E und F ihre Stellung nicht ändern. Wenn aber der Kolben A nahe an das Ende seines Aufganges kommt, so ergreift der Ansatz X den Daumen, welchen das obere Ende des Bogens P trägt, und erhebt diesen Bogen, indem er ihn und den Hebel OP um den Punkt O dreht; zu gleicher Zeit dreht sich der Hebel ST um den Punkt S und die beiden Kolben K, L werden in ihre oberste Stellung geführt (Fig. 566). Von dem Augenblick an erfährt das Wasser über dem Kolben F nicht mehr den Druck des Aufschlagwassers, weil es nun mit der Röhre MM in Verbindung steht; die Kolben E,F steigen in die Höhe; das Wasser, welches sich unter dem Kolben A befindet, wird mit dem Austragrohr G in Verbindung gesetzt, und dieser Kolben steigt nun in Folge seines Gewichtes und des Gewichtes der Stücke, welche mit ihm in Verbindung stehen, abwärts. Wenn der Treibkolben A nahe am Ende seines Niederganges angekommen ist, so ergreift der Ansatz Y den unteren Daumen des Bogens P, und indem sich dieser senkt, wird der Hebel OP in seine frühere Lage zurückgeführt (Fig. 565); zu gleicher Zeit kehren die Kolben K, L in ihre tiefste Stellung zurück; das Aufschlagwasser kann durch die Röhre H bei I eintreten und auf die obere Fläche des Kolbens F wirken; dadurch senken sich die beiden Kolben E,F; die Röhre C wird also von Neuem mit dem unteren Theil des Cylinders BB in Verbindung gesetzt, der Treibkolben A steigt wieder aufwärts u. s. f. Man sieht also, dass die Maschine von der Zeit an, wo sie angefangen hat sich zu bewegen, ihre Steuerung selbst besorgt und ihren Gang fortsetzt, ohne dass man nöthig hätte sich mit ihr zu beschäftigen.

Um den Gang der Maschine reguliren zu können, hat man in den Röhren C, G zwei Drosselventile U, V angebracht. Indem man diese Ventile in passendem Sinne mehr oder weniger dreht, bringt man Verengungen hervor, welche den Gang des Kolbens A, sowohl bei seinem Auf- als auch bei seinem Niedergang, verzögern (§. 358), und man kann es auf diese Weise dahin bringen, dass er eine beliebige Geschwindigkeit annimmt. Die Stellungen, welche man den Ansätzen X, Y an dem Stabe NN gibt, reguliren ausserdem die Länge des Kolbenschubes. Um die Maschine zum Stehen zu bringen, darf man nur die beiden Hähne, von denen der eine in der Röhre H, der andere in der Röhre MM angebracht ist, schliessen; durch diese einfache Manipulation bringt man es dahin, dass die Kolben E, F weder auf- noch abwärts

gehen können; sie bleiben in dem Moment, wo diese beiden Hähne geschlossen werden, an der Stelle, wo sie sich befinden, stehen. Man kann sich sogar leicht überzeugen, dass dazu das Schliessen eines einzigen dieser Hähne hinreicht. Wenn man, nachdem die Maschine längere oder kürzere Zeit still gestanden war, die Hähne, welche man geschlossen hatte, wieder öffnet, so kommt die Maschine von selbst wieder in Gang und setzt ihre Bewegung von dem Punkt an, wo sie unterbrochen wurde, wieder fort.

Die Einschnitte, welche man oben und unten an dem Kolben E angebracht sieht, und die, in der Richtung seiner Längenachse gehend, sich allmählich verlaufen, haben den Zweck zu verhindern, dass die Verbindung der Oeffnung D mit der Röhre C des Aufschlagwassers, sowie mit dem Austragrohr G zu plötzlich hergestellt und wieder unterbrochen wird, wodurch allemal Stösse entstehen müssten und die Maschine schnell unbrauchbar gemacht werden würde. Wenn der Kolben E vor der Oeffnung D vorbeigeht, indem er sich senkt, so beginnt das Aufschlagwasser mit dieser Oeffnung durch die oberen Einschnitte zu communiciren. Der Durchgang, welcher auf diese Weise dem Aufschlagwasser geboten ist, vergrössert sich allmählich, da die Tiefe der Einschnitte von ihrem Ursprung an bis zur Basis des Kolbens zunimmt: die Verbindung des Aufschlagwassers mit der Oeffnung D stellt sich also nach und nach her, bis endlich diese Oeffnung vollständig frei geworden ist. Ebenso ist dies bei der Herstellung der Verbindung der Oeffnung D mit dem Austragrohr, wenn der Kolben E wieder aufwärts geht.

Wenn der Kolben E vor der Oeffnung D vorbeigeht, so erfährt er von Seite des Wassers, welches in derselben enthalten ist, eine starke Seitenpressung. Damit dieser Druck, mit welchem der Kolben E an den Wänden des Cylinders, in welchem er sich bewegt, angepresst wird, nicht zu gross wird, wodurch eine bedeutende Reibung hervorgebracht werden würde, weitet man diesen Cylinder ringsum in gleicher Höhe mit der Oeffnung D aus. Auf diese Art umgibt das in D enthaltene Wasser den Kolben E ringsum und übt folglich seinen Druck auf den ganzen Umfang des Kolbens aus; derselbe wird also weder auf der einen noch auf der anderen Seite an die Wände des Cylinders, in welchem er sich befindet, angedrückt; er bewegt sich, ohne an diesen Wänden mehr Reibung zu erfahren, als wenn er dem Drucke, von dem wir sprechen, gar nicht ausgesetzt wäre.

In den Bleibergwerken von Huelgoat sind zwei solche Maschinen wie die, welche wir soeben beschrieben haben, neben-

einander aufgestellt. Sie werden durch ein Wassergefälle von 60 Meter Höhe bewegt. Der Treibkolben A einer jeden von ihnen ist mit einer langen Stange verbunden, welche durch den Boden des Cylinders BB hindurchgeht und in einem Schachte vertikal abwärts steigt, um eine Pumpe in Bewegung zu setzen. Diese Pumpe hebt das Wasser des Schachtes in einem Strahl bis auf eine Höhe von 230 Meter. Das Wasser wird in die Steigröhre hineingedrückt und auf diese bedeutende Höhe emporgetrieben, wenn der Kolben A in dem Cylinder BB steigt. Während dieser Treibkolben mit der langen Stange, welche ihn mit dem Kolben der Pumpe verbindet, wieder abwärts geht, hat er keinen Nutzwiderstand zu überwinden; desshalb muss man besondere Mittel anwenden, um die Gewichte von allen abwärts gehenden Maschinentheilen zum grössten Theil in's Gleichgewicht zu setzen und dadurch zu verhindern, dass sie bei ihrem Niedergang eine zu rasche Bewegung annehmen, wodurch grosse Nachtheile hervorgebracht werden könnten. Anstatt den Cylinder BB in gleicher Höhe mit dem Stollen, durch welchen sich das von der Pumpe gelieferte Wasser sowohl, als auch das des Austragrohrs G ergiessen muss, aufzustellen, hat man ihn 14 Meter unter diesem Stollen angebracht. Die Höhe der Kraftwassersäule wird also dadurch auf 74 Meter erhöht. Aber das Aufschlagwasser kann, nachdem es den Treibkolben A in die Höhe gehoben hat, beim Abwärtsgehen desselben nur dadurch aus dem Cylinder BB geschafft werden, dass es in dem Austragrohr G wieder auf eine Höhe von 14 Meter gehoben wird. Diese Erhebung des Wassers, nachdem es in der Maschine seine Wirkung gethan hat, bildet einen Widerstand, welchen der Treibkolben beim Abwärtsgehen zu überwinden hat, und welcher so berechnet ist, dass die Bewegung desselben genügend ermässigt wird. Der auf diese Weise hervorgebrachte Widerstand ist aber nicht mit einem solchen zu vergleichen, der wie derjenige, welcher durch ein Drosselventil hervorgebracht wird, das den Durchgang des Wassers mehr oder weniger verengt, einen Theil der bewegenden Kraft aufzehrt, ohne irgend einen Nutzen zu bringen; seine Anwendung hat, wie wir gesehen haben, eine entsprechende Erhöhung der Kraftwassersäule zur Folge.

Die schönen Maschinen von Huelgoat, die einen vollkommen sanften und regelmässigen Gang haben, machen nahezu zwei Drittel der durch das Gefäll entwickelten Bewegungsarbeit nutzbar.

§. 438. **Doppelt wirkende Wassersäulenmaschine.** Die Einrichtung der doppelt wirkenden Wassersäulenmaschine hat viel Aehnlichkeit mit derjenigen der einfach wirkenden. Ein

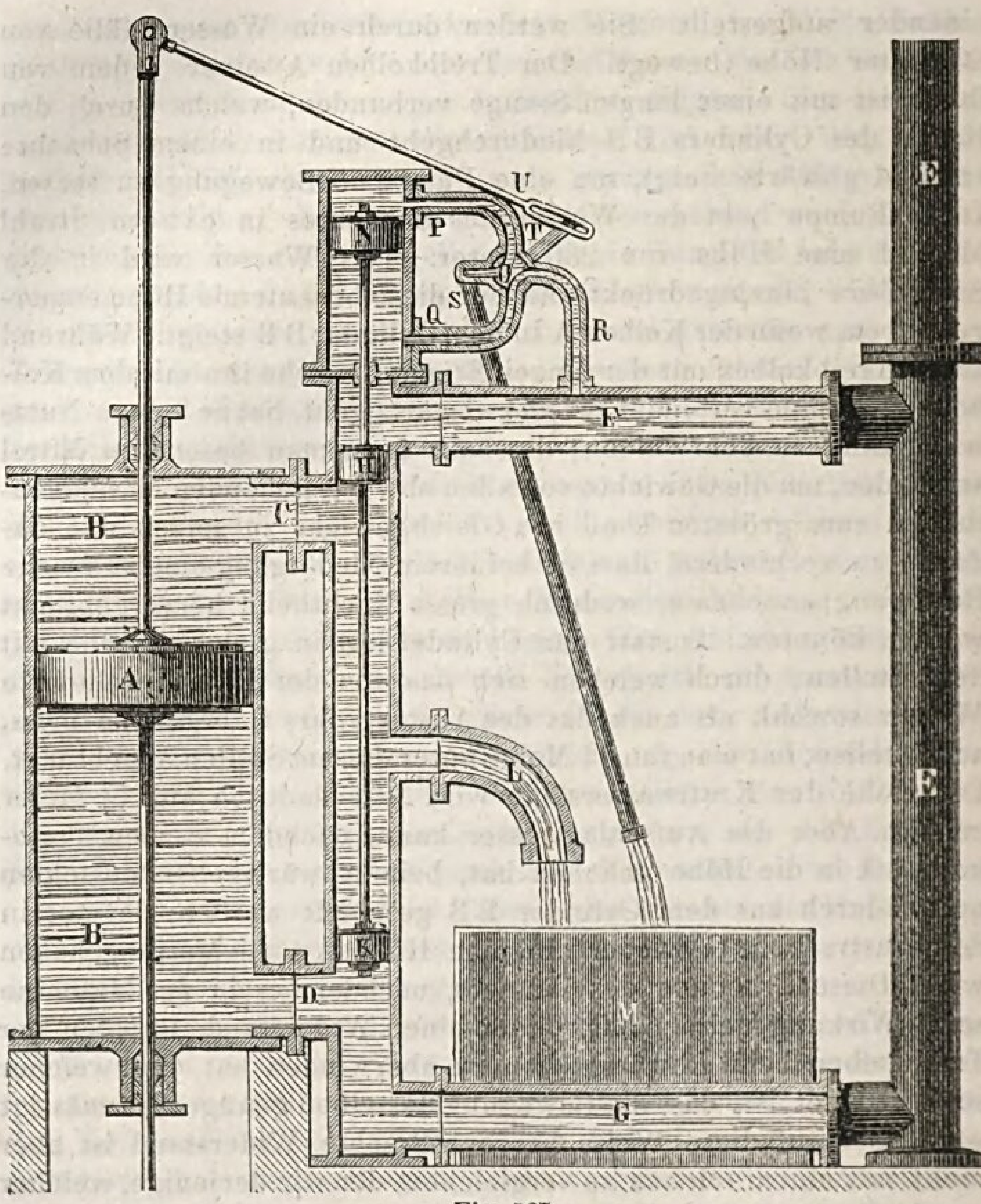


Fig. 567.

wesentlicher Unterschied besteht nur darin, dass sich der Kolben A (Fig. 567) in einem an beiden Enden geschlossenen Cylinder BB bewegt und dass die Steuerungsvorrichtung, anstatt abwechselnd das Einfallrohr des Kraftwassers und dann wieder das Austragrohr mit dem unteren Theil des Treibcylinders zu verbinden, diese Verbindungen abwechselnd mit dem oberen und dann mit dem unteren Theil dieses Cylinders durch die Oeffnungen C und D herstellen muss. Das Kraftwasser kommt durch die vertikale Röhre E bei der Maschine an. Diese Röhre verzweigt sich in die beiden Röhren F und G, von denen die erste das Wasser

nach der Oeffnung C führt, während die zweite es nach der Oeffnung D leitet. Zwei Kolben, H und K, die an einer und derselben Stange befestigt sind, können sich in einem kleinen Cylinder, der zur Seite des Hauptcylinders BB angebracht ist, bewegen. In der in der Figur dargestellten Stellung dieser beiden Kolben gelangt das Kraftwasser durch die Röhre G und die Oeffnung D in den unteren Theil des Cylinders BB; es übt also auf die untere Fläche des Kolbens A einen Druck aus, welcher von unten nach oben gerichtet ist. Zu gleicher Zeit communicirt das Wasser, welches über dem Kolben A steht, frei durch die Oeffnung C mit dem Austragrohr L. Da also der Kolben A auf seiner unteren Fläche einem grösseren Druck ausgesetzt ist als auf seiner oberen, so nimmt er eine aufsteigende Bewegung an; das Wasser über dem Kolben fliesst durch die Röhre L aus und fällt in einen Behälter M, der mit dem Kanal in Verbindung steht, welcher das ausgediente Wasser abzuführen hat. Denken wir uns nun, dass in dem Augenblick, wo der Kolben A das oberste Ende des Cylinders BB erreicht hat, die beiden Kolben H, K sich senken, sodass sie sich bezüglich unter die Oeffnungen C, D stellen; alsdann communicirt die Oeffnung C durch die Röhre F mit dem Kraftwasser, während die Oeffnung D mit dem Austragrohr L in Verbindung steht: der Kolben A geht also abwärts, indem er alles Wasser, das sich unter ihm befindet, durch jenes Austragrohr ausfliessen macht. Wenn die Kolben H, K, nachdem der Treibkolben A ganz unten angekommen ist, ihre ursprüngliche Lage wieder einnehmen, so wirkt das Kraftwasser durch die Oeffnung D wieder von unten auf den Kolben A und treibt ihn in die Höhe u. s. f.

Man sieht also, dass man es, um die Verbindung der Oeffnungen C, D abwechselnd mit dem Einfallrohr E des Kraftwassers und mit dem Austragrohr L herzustellen, nur dahin bringen darf, dass die beiden Kolben H, K sich senken, wenn der Treibkolben A oben angekommen ist, und dass sie dagegen in die Höhe steigen, wenn derselbe an den tiefsten Punkt seines Schubes gelangt. Diese hin- und hergehende, intermittirende Bewegung der Kolben H, K wird mittelst eines Kolbens N hervorgebracht, der am Ende der gemeinschaftlichen Stange jener beiden Kolben befestigt ist und sich in einem besonderen Cylinder bewegen kann, der über dem liegt, in welchem sich die Kolben H, K befinden. Ein Hahn O, der zwei verschiedene Stellungen annehmen kann, verbindet mittelst der beiden Röhren P und Q abwechselnd den oberen und dann wieder den unteren Theil dieses kleinen Cy-

linders entweder mit dem Kraftwasser oder mit der freien Luft. In der in der Figur gezeichneten Stellung dieses Hahnes strömt das Kraftwasser, welches in der Röhre F ankommt, durch die Röhren R und Q und drückt den Kolben N von unten nach oben, während das Wasser über diesem Kolben durch die Röhre S, die sich über dem Behälter M endigt, mit der freien Luft in Verbindung ist. Wenn der Hahn O um 90 Grad gedreht wird, so nimmt er die in Fig. 568 gezeichnete Stellung ein, und die Verbindungen sind nun umgekehrt; das Kraftwasser wirkt, indem es durch die Röhren R und P strömt, auf die obere Fläche des Kolbens N, und das Wasser unter diesem Kolben communicirt durch die Röhren Q und S mit der freien Luft; dadurch geht der Kolben N abwärts und mit ihm die beiden Steuerkolben H, K. Der Hahn O ist an einem seiner Enden mit einer Kurbel T versehen, deren Zapfen durch das verlängerte Oehr hindurchgeht, in welchem sich eine Lenkstange U endigt, die an einer Verlängerung der Stange des Treibkolbens A befestigt ist. So lange sich der Kurbelzapfen zwischen den Enden des Oehrs befindet, bewegt sich der Kolben A, ohne den Hahn O im geringsten zu drehen; die Lenkstange U wirkt auf die Kurbel T nur dann, wenn der Kolben A nahe daran ist, das eine oder andere Ende seines Schubes zu erreichen. Daraus ist leicht einzusehen, dass die Maschine wieder sich selbst steuert, und dass sie auf diese Weise beliebig lange in Gang bleiben kann, ohne dass man nöthig hätte, sich mit ihr zu beschäftigen, vorausgesetzt, dass das Aufschlagwasser ungehindert durch die Röhre E zuströmt und immer im Stande ist, die an dem Kolben A wirkenden Widerstände zu überwinden.

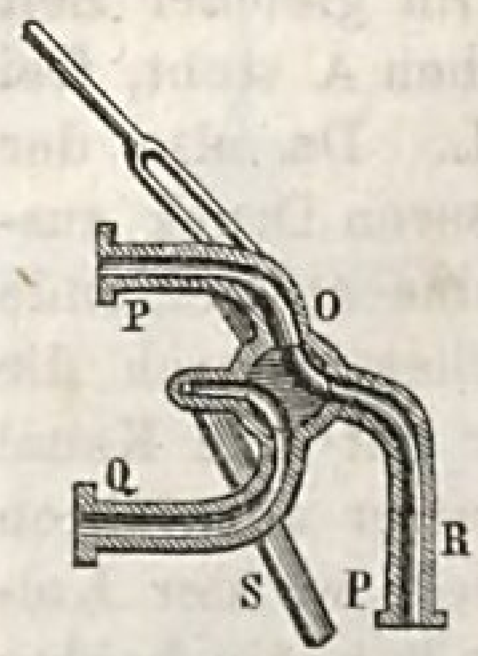


Fig. 568.

Die doppelt wirkende Wassersäulenmaschine kann zur Bewegung aller Arten von Arbeitsmaschinen verwandt werden; zu dem Ende darf man nur die hin- und hergehende Bewegung des Kolbens A in eine drehende Bewegung einer Welle verwandeln; wie das geschehen kann, werden wir später, wenn wir von den Dampfmaschinen handeln, ausführlich besprechen. In diesem Fall kann dann auch die Steuerung etwas verändert werden: man kann an der Welle, welche die Maschine in Drehung versetzt, eine Excentrik anbringen, die den Kolben H, K direkt die hin- und hergehende Bewegung ertheilt, welche dieselben annehmen müssen, um das Aufschlagwasser bald in dem einen, bald in dem andern Sinne wirken zu machen. Wir werden später, bei Gelegenheit der

Dampfmaschinen ausführlicher beschreiben, wie diese Excentriks eingerichtet sind; für jetzt begnügen wir uns damit, ihre Anwendung bei den Wassersäulenmaschinen blos anzugeben.

In der Regel werden die Wassersäulenmaschinen dazu angewandt, um Wasser auf eine bedeutende Höhe zu heben. So wird z. B. die Soole von Reichenhall in Oberbayern auf Umwegen 30 Stunden weit nach Rosenheim geleitet, um hier, sowie auch an einigen Zwischenorten, z. B. in Traunstein, versotten zu werden. Auf diesem Wege befinden sich 9, sämmtlich von *Reichenbach* construirte Wassersäulenmaschinen, welche die Soole über die Berge heben.

§. 439. **Der hydraulische Widder.** — Wir haben oben (§. 422) gesagt, dass das Wasser eines Gefälles manchmal auch direkt, ohne Zwischenmaschine, wirkt, um eine Nutzarbeit hervorzubringen: ein interessantes Beispiel hievon wollen wir nun in dem hydraulischen Widder kennen lernen. Diese sinnreiche Maschine, die von *Montgolfier* im Jahre 1796 erfunden wurde, hat den Zweck, die Kraft eines Wassergefälles zu benützen, um einen Theil des durch dasselbe gelieferten Wassers auf ein Niveau zu heben, das über dem Spiegel des Oberwassers gelegen ist.

Denken wir uns, dass das Wasser des Gefälles, welches man zur Verfügung hat, nur durch eine Röhre von gewisser Länge, welche sich im unteren Bette endigt, ausfliessen könne. Wenn diese Röhre an ihrem unteren Ende geöffnet ist, so ergiesst sich das Wasser aus derselben, indem es eine Geschwindigkeit annimmt, welche von der Höhe des Gefälls und von der Reibung, die durch seine Bewegung in der Röhre hervorgerufen wird, zugleich abhängt. Wenn der Ausfluss auf diese Weise hergestellt ist, und man verschliesst mit einem mal die Oeffnung der Röhre, so wird alles in ihr enthaltene Wasser gezwungen plötzlich stille zu stehen; aber das kann nicht geschehen, ohne dass diese Wassermasse einen bedeutenden Druck auf die Wände, welche sie einschliessen, ausübt. Denken wir uns nun, dass auf die Ausflussröhre, von welcher wir eben gesprochen haben, eine Steigröhre aufgesetzt sei, und dass das untere Ende dieser Steigröhre durch ein Ventil geschlossen werde, das sich von unten nach oben öffnet. In dem Augenblicke, wo die in Bewegung befindliche Wassersäule plötzlich zum Stillstand gebracht wird, öffnet sie dieses Ventil und das Wasser stürzt sich in die Steigröhre, wo es bis zu einer gewissen Höhe emporsteigt. Wenn man dann die Bewegung des Wassers in der Ausflussröhre von Neuem beginnen

lässt und es hierauf wieder plötzlich zum Stehen bringt, indem man die Ausflussöffnung der Röhre verschliesst, so öffnet die Flüssigkeit von Neuem das Ventil der Steigröhre, um theilweise in diese Röhre überzugehen, sodass das Niveau in derselben noch höher steigt. Indem man auf diese Weise dieselbe Operation wiederholt, kann man das Wasser in der Steigröhre auf eine bedeutend grössere Höhe, als die des Gefälls beträgt, emporheben; wenn folglich diese Röhre oben in einem Reservoir endigt, so kann man dasselbe anfüllen, wenn man nur die Manipulation, die wir soeben beschrieben haben, lange genug fortsetzt. Dies ist das Princip des hydraulischen Widders. Sehen wir nun, welche Einrichtung ihm von *Montgolfier* gegeben wurde, und wie er in Folge derselben ganz für sich selbst in Thätigkeit bleibt, ohne dass man nöthig hätte, sich mit ihm zu beschäftigen.

Die Figur 569 ist ein Durchschnitt des hydraulischen Widders, welcher sich im Schlosse *Celle-Saint-Cloud* bei Paris befindet und der von *Montgolfier* selbst zu dem Zwecke angelegt wurde, um das im Schlosse erforderliche Wasser in die Höhe zu heben. Das Wasser eines hochgelegenen Teiches, der durch

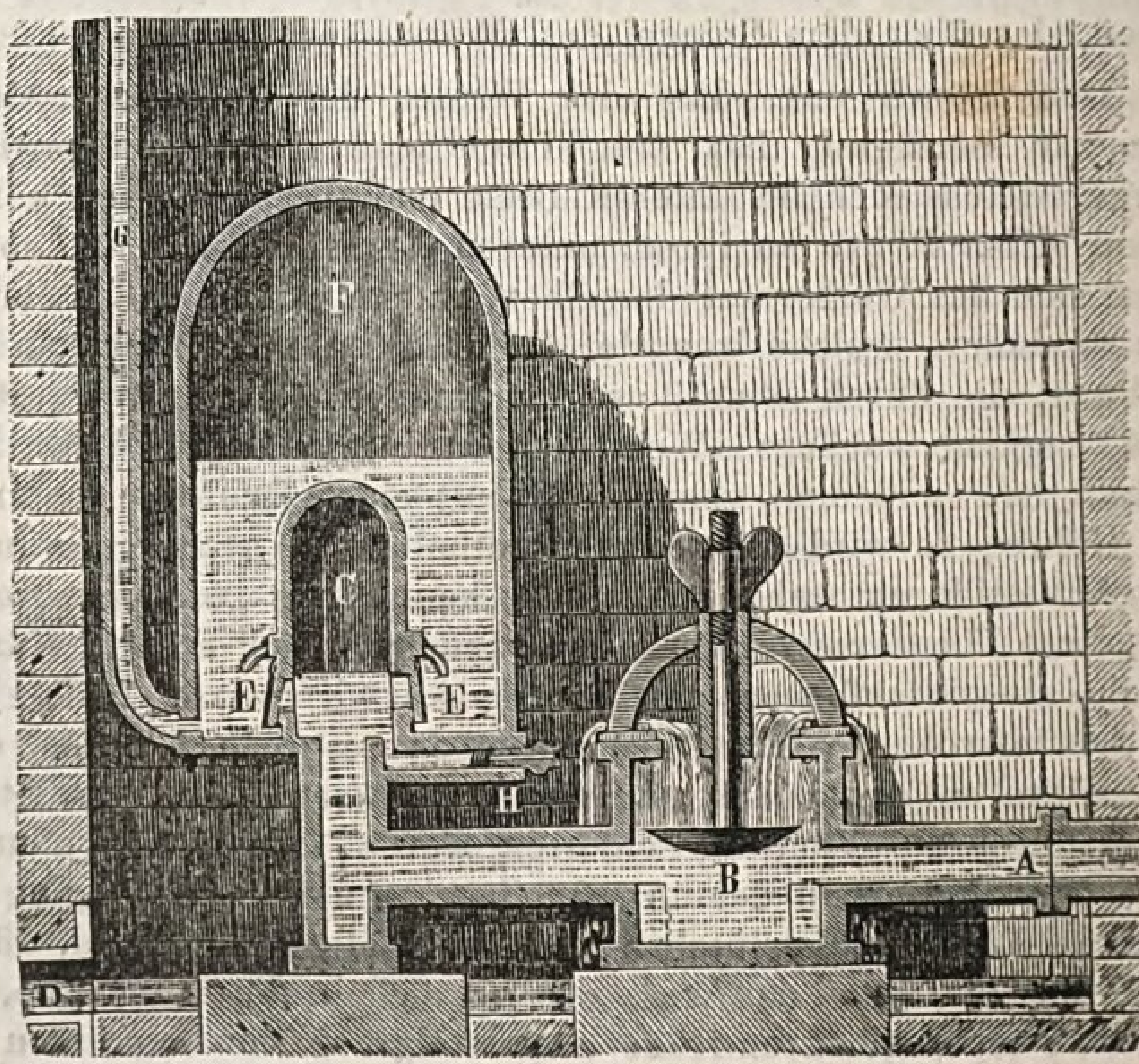


Fig. 569. (Maassstab 12 : 100.)

Quellen gespeist wird, wird durch die Röhre A herabgeleitet. Diese Röhre besitzt eine nach oben gekehrte Oeffnung, durch welche sich das Wasser ergiesst. Ein Ventil B ist an seinem Stabe an einer Art von Bügel aufgehängt, der sich mitten über dieser Oeffnung befindet; das ausfliessende Wasser muss also rings um dieses Ventil, wenn es geöffnet ist, herumgehen, um durch die Oeffnung in's Freie gelangen zu können. Von dem Augenblick an, wo der Ausfluss beginnt, wird die Geschwindigkeit des Wassers immer grösser und grösser; daraus folgt, dass das Ventil B von Seiten der Flüssigkeit einen immer grösser werdenden Druck erfährt; dieser Druck reicht aber bald hin, um das Ventil zu heben, und dieses legt sich gegen die Ränder der Ausflussöffnung und verschliesst dieselbe vollständig. Sobald dies aber geschehen ist, muss die ganze in der Röhre A enthaltene Wassermasse, die eine ziemlich grosse Geschwindigkeit besitzt, plötzlich stillstehen und übt dadurch einen sehr bedeutenden Druck auf alle Theile der Wände, welche sie umschliessen, aus; dieser Druck öffnet die Ventile E, E und eine gewisse Menge Wasser dringt durch diese Ventile in einen Behälter F, welcher dieselben umschliesst, und gelangt von da aus in die Steigröhre G. Nach Verfluss einer sehr kurzen Zeit ist die ganze Geschwindigkeit des in der Röhre A enthaltenen Wassers vernichtet; die Ventile E, E schliessen sich; das Ventil B, welches an seiner inneren Fläche keinen so grossen Druck mehr erfährt, fällt in Folge seines Gewichts in seine ursprüngliche Lage zurück, und das Spiel der Maschine beginnt von Neuem wie vorhin. Das Wasser, welches während der ganzen Zeit, in welcher das Ventil B geöffnet ist, aus der Röhre A ausfliesst, fällt auf den umgebenden Boden herab und wird durch den Kanal D abgeführt.

Die Röhre A erhebt sich an ihrem linken Ende, um sich in einem Raum C zu endigen, an welchem unten die Ventile E, E angebracht sind. Dieser Raum enthält in seinem oberen Theile Luft. Der Druck dieser Luft spielt eine wichtige Rolle in dem Gang der Maschine. Wenn der Ausfluss des Wassers durch Verschluss des Ventils B plötzlich gehemmt wird und es stünde die Flüssigkeit überall nur mit festen Wänden in Berührung, so würde ein ziemlich heftiger Stoss hervorgebracht werden. Die in C enthaltene Luft verhütet diesen Stoss fast vollständig, wodurch nicht nur der Apparat mehr geschont, sondern ausserdem auch eine grössere Menge von Nutzarbeit producirt wird. Von dem Augenblick an, wo das Wasser bei B nicht mehr ausfliessen kann, presst es die Luft in C zusammen und verliert so nach und nach

seine Geschwindigkeit; zu gleicher Zeit vergrössert sich der vom Wasser nach allen Seiten hin ausgeübte Druck. Wenn aber die Geschwindigkeit des Wassers vollständig Null geworden ist, so übt die Luft in C, da sie ihr ursprüngliches Volumen wieder einzunehmen sucht, eine Rückwirkung aus; sie drückt das Wasser wieder in die Röhre A zurück und der Druck nimmt allmählich ab. Während dieser Zeit bleiben die Ventile E, E offen, so lange der Druck, welchen sie von innen nach aussen erfahren, denjenigen, welcher fortwährend auf ihre äussere Seite ausgeübt wird, übersteigt, und gewähren so einem Theil des Wassers freien Durchgang. Die rückgängige Bewegung, welche das Wasser in der Röhre A annimmt und welche durch die Reaction der in C enthaltenen Luft hervorgebracht wird, hört noch nicht sogleich auf, wenn auch der Druck des Wassers schon auf denjenigen zurückgekehrt ist, welcher allein aus der Höhe des Gefälls entspringt; das Wasser fährt in Folge der gewonnenen Geschwindigkeit fort, sich rückwärts zu bewegen; in Folge dessen vermindert sich der Druck noch weiter und kommt selbst unter den der atmosphärischen Luft herab. Durch diese Art von Saugen fällt das Ventil B herab und das Wasser beginnt von Neuem durch die darüber befindliche Oeffnung auszufliessen.

Der Behälter F, welcher die Ventile E, E umschliesst und aus welchem sich die Steigröhre G erhebt, enthält in seinem oberen Theile gleichfalls Luft. Diese zweite Luftmasse hat den Zweck, das Wasser in der Steigröhre in stetiger Bewegung zu erhalten, und wirkt genau auf dieselbe Art wie diejenige, welche in dem Windkessel der Feuerspritzen (§. 412) enthalten ist. In dem Moment, wo sich die Ventile E, E öffnen, dringt das Wasser in den Behälter F ein, indem es die Luft, welche darin enthalten ist, zusammendrückt; es ist also nicht genöthigt, sich unmittelbar in die Steigröhre zu stürzen, wie es ohne diese Einrichtung der Fall sein würde. Es ist klar, dass der zur Oeffnung der Ventile E, E nöthige Druck viel grösser sein müsste in dem Fall, wo in dem Moment, in dem sie sich öffnen, die ganze Wassersäule in der Steigröhre plötzlich aus dem Zustande der Ruhe in den der Bewegung übergeführt werden müsste, und dass in Folge dessen diese Ventile bei jedem Stoss des Widders auch nur kürzere Zeit geöffnet bleiben würden. Die Weglassung der in F enthaltenen Luft würde also eine bedeutende Verminderung in der Menge des gehobenen Wassers zur Folge haben.

Das Wasser absorbirt immer eine gewisse Menge Luft, mit welcher es in Berührung steht. Diese absorbirte Luft ist es, welche

aus dem Wasser, wenn man es in einem offenen Gefäss erwärmt, wieder entweicht und sich zum Theil an den Wänden des Gefässes in Form von kleinen Bläschen anhängt. Die Menge Luft, welche das Wasser auf diese Weise absorbirt, ist um so grösser, je stärker der Druck ist, mit welchem die Luft über ihm lastet. Daraus folgt, dass die Luft in dem Reservoir F nach und nach von dem Wasser, welches fortwährend darin ankommt, und über welchem sie mit einem Drucke, der der Höhe der Wassersäule in der Steigröhre entspricht, lastet, absorbirt wird. Diese Luft nimmt daher allmählich ab und kann sogar vollständig verschwinden, wenn man nicht ein besonderes Mittel anwendet, um sie wieder zu erneuern. Aus diesem Grunde bringt man unter einem der Ventile E, E eine horizontale Oeffnung H an. Diese Oeffnung ist durch ein Ventil geschlossen, das sich von aussen nach innen öffnet. In dem Moment, wo durch die rückgängige Bewegung des Wassers in der Röhre A in dieser Röhre eine Art Saugen hervorgebracht wird, dringt eine kleine Menge Luft durch den Kanal H, dessen Ventil sie öffnet, ein und vermischt sich mit der Luft, welche bereits in C enthalten ist. Das Eindringen dieser kleinen Menge Luft bei jedem Stoss des Widders verursacht, dass ein entsprechender Theil Luft des Reservoirs C die Ventile E,E, wenn sie geöffnet sind, durchdringt und in dem oberen Theil des Behälters F emporsteigt, um dort diejenige wieder zu ersetzen, welche das Wasser fortwährend mit sich fortführt.

Der Wirkungsgrad eines gut gebauten hydraulischen Widders kann sich bis auf 0,60 erheben.

V. Maschinen, welche zur Bewegung der Gase dienen.

§. 440. Es kommen viele Fälle vor, wo man Gase durch Anwendung gewisser Maschinen in Bewegung zu setzen hat. Bald handelt es sich darum, einen grösseren oder geringeren Theil des Gases, welches in einem geschlossenen Raume enthalten ist, aus diesem Raume heraus zu schaffen; bald soll im Gegentheil eine grössere Menge Gas in einem solchen Raum angesammelt werden; wieder ein andermal hat man der Luft eine grosse Geschwindigkeit mitzutheilen und sie eine Strecke weit mit derselben fortzubewegen, sei es nun, um die Verbrennung in irgend einer Feuerungsanlage zu unterhalten, sei es, um Staub und dergleichen kleine Körperchen mit ihr fortreissen zu lassen;

endlich hat man auch noch zur Lüftung der Bergwerke die Luft in den Stollen und Schichten derselben in Bewegung zu versetzen u. s. w. Wir wollen uns nun mit den Einrichtungen der verschiedenen Maschinen, welche angewandt werden, um diese verschiedenen Zwecke zu erreichen, näher bekannt machen.

Welches aber auch der Zweck sein möge, welchem eine solche Maschine dienen soll, so muss sie doch immer so eingerichtet sein, dass das Gas, welches sie in Bewegung setzt, in der Maschine selbst nur eine geringe Geschwindigkeit besitzt, da ausserdem eine sehr beträchtliche Reibung hervorgebracht werden könnte. Ausserdem muss man scharfe Krümmungen und bedeutende Verengungen in den Kanälen, in welchen sich das Gas bewegen soll, so viel als möglich zu vermeiden suchen. Wenn die Maschine blos dazu bestimmt ist, eine gewisse Gasmasse fortzuschaffen, so muss man sie so einrichten, dass das Gas, indem es sie verlässt, eine möglichst kleine Geschwindigkeit besitzt; denn die Geschwindigkeit, welche es nach seinem Austritt aus der Maschine noch hat, konnte ihm nur durch Aufwand einer gewissen Quantität von Bewegungsarbeit mitgetheilt werden. Wenn die Maschine dagegen dem Gase eine gewisse, ziemlich grosse Geschwindigkeit ertheilen soll, so muss man suchen, dass es diese Geschwindigkeit erst in der Nähe des Punktes erhält, wo der Gasstrahl seine Wirkung äussern soll, damit es sich nicht mit so grosser Geschwindigkeit in mehr oder weniger langen Röhren fortbewegen muss.

§. 441. **Die Luftpumpe.** — Die Luftpumpe, deren wir uns schon bei verschiedenen Versuchen bedient haben, hat den Zweck, einen geschlossenen Raum luftleer zu machen, d. h. die Luft, welche in demselben enthalten ist, daraus zu entfernen. Diese Maschine (Fig. 570) besteht so zu sagen aus zwei mit einander vereinigten Saugpumpen (§. 407). Die beiden Kolbenstangen sind gezahnt und greifen in ein Zahnrad, das zwischen ihnen angebracht ist, und auf dessen Achse ein Hebel mit Handgriffen aufgesteckt wird, der eine Art doppelter Kurbel bildet. Wenn man die beiden Handgriffe fasst und dem Hebel eine geeignete, absetzende Rotationsbewegung um seine Achse ertheilt, so gibt man dadurch den beiden Kolben eine auf- und abgehende Bewegung. Um uns über die Wirkungsweise der Maschine Rechenschaft zu geben, nehmen wir zunächst an, dass die Pumpe nur einen einzigen Kolben und folglich auch nur einen einzigen Stiefel besitze.

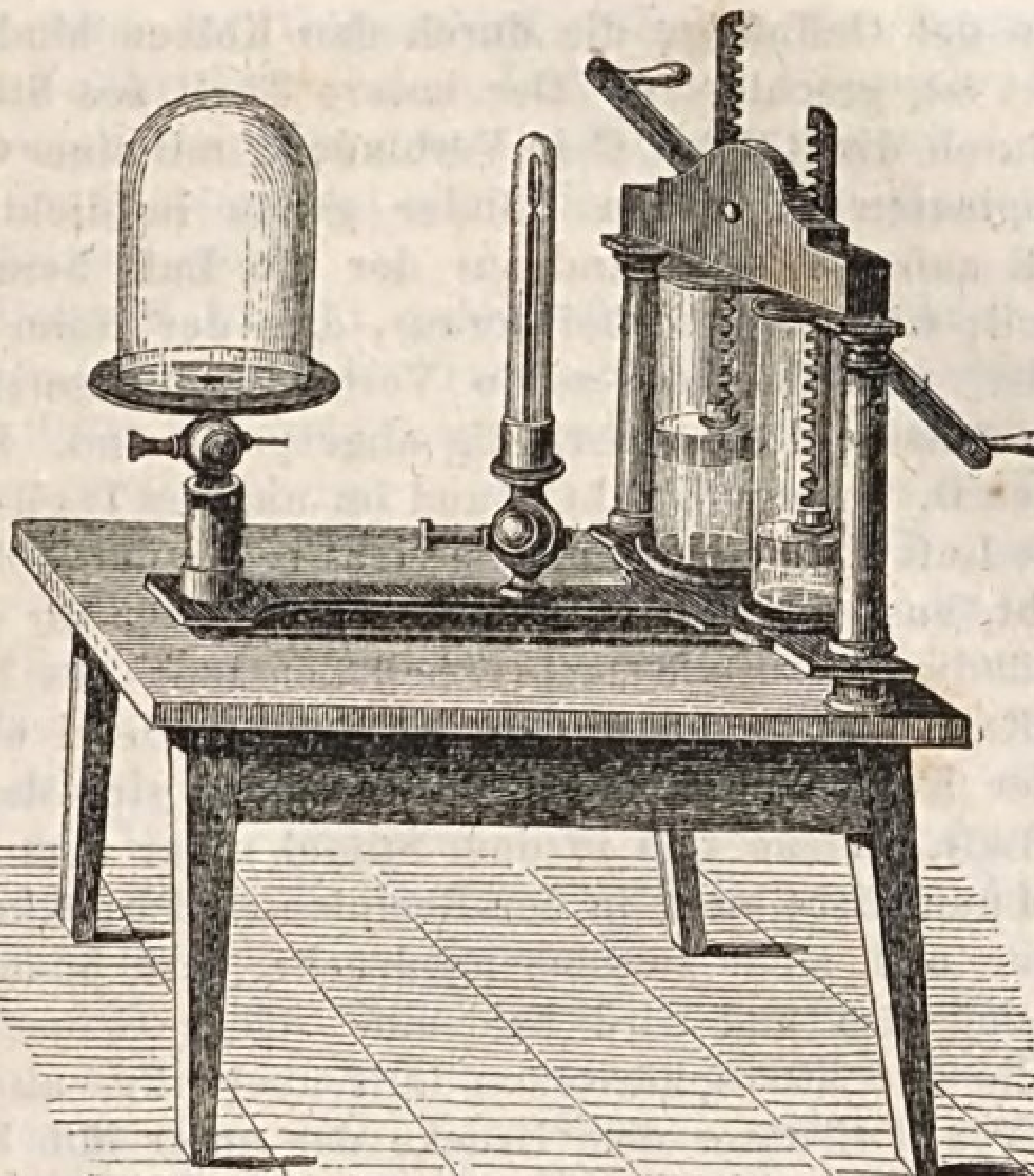


Fig. 570.

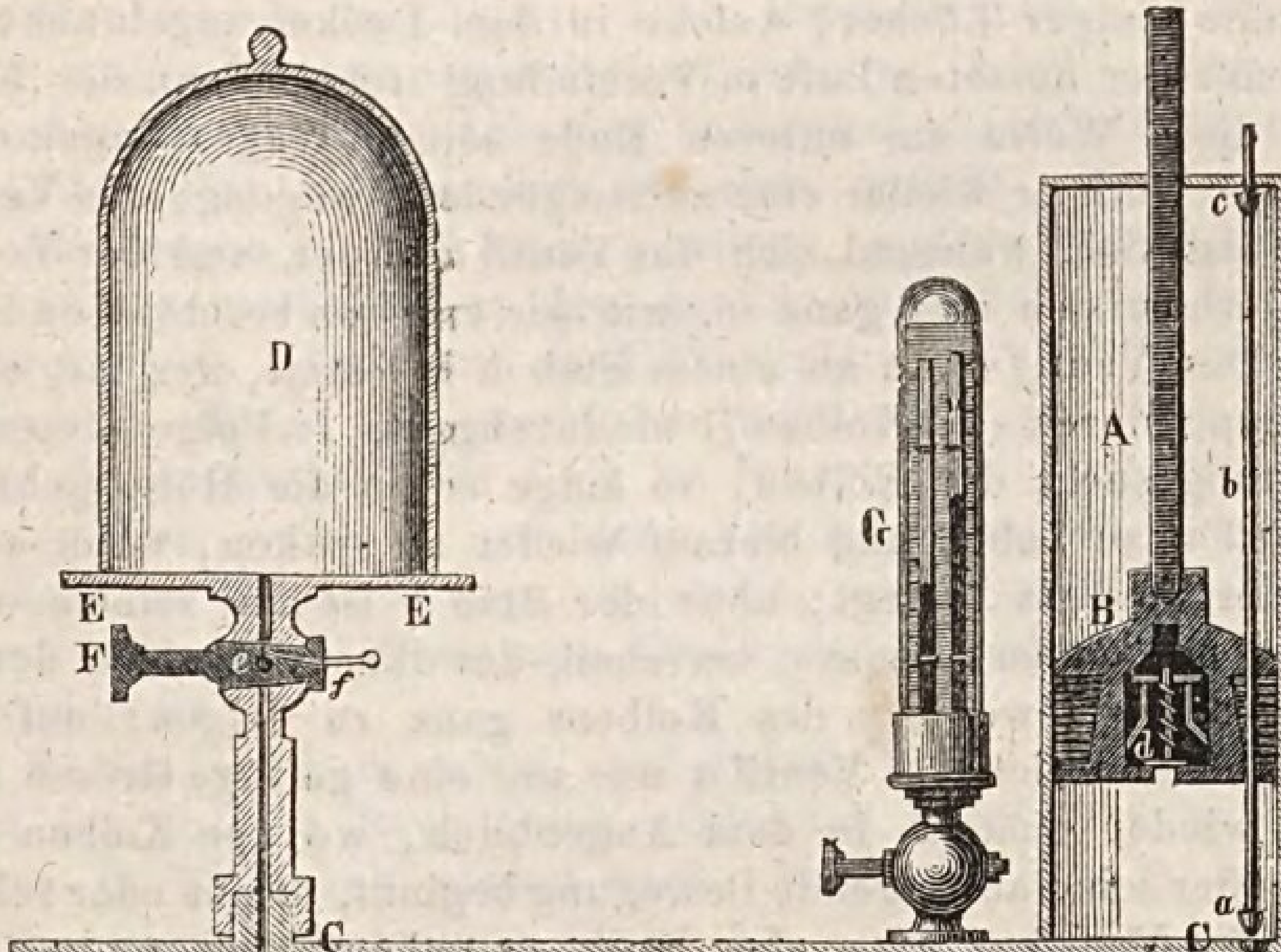


Fig. 571.

Wenn der Kolben B (Fig. 571) in dem Pumpenstiefel A in die Höhe geht, so ist das Ventil *a* offen, das Ventil *d* dagegen,

welches in der Oeffnung, die durch den Kolben hindurch geht, angebracht ist, geschlossen. Der untere Theil des Stiefels steht alsdann durch die Röhre C C in Verbindung mit einer Glasglocke, dem Recipienten D, deren Ränder genau luftdicht auf dem Teller E E aufschliessen, und aus der die Luft herausgepumpt werden soll; wir setzen dabei voraus, dass der Hahn F passend gedreht ist, und dass die so in Verbindung gesetzten Räume gegen die äussere Luft vollständig abgesperrt sind. Die in dem Recipienten D, in dem Kanal C C und im unteren Theil des Stiefels enthaltene Luft dehnt sich in dem Maasse, als der Kolben in die Höhe geht, aus, um den ganzen Raum welcher ihr dargeboten ist, vollständig auszufüllen; ein Theil der Luft des Recipienten und des Kanals C C geht also in den Pumpenstiefel über. Wenn hierauf der Kolben abwärts geht, so schliesst sich das Ventil *a*, und die Luft, welche sich in dem Stiefel unter dem Kolben befindet und nun nicht mehr in den Recipienten zurückkehren kann, wird mehr und mehr zusammengedrückt; ihre Spannkraft vergrössert sich also und wird bald eine solche Grösse erreichen, dass sie die der atmosphärischen Luft übertrifft; alsdann öffnet sich das Ventil *d* unter dem Drucke der unter ihm befindlichen Luft, welche zu entweichen sucht, und diese Luft durchdringt den Kolben und strömt in den oberen Theil des Stiefels, der mittelst einiger Löcher, welche in dem Deckel angebracht sind, frei mit der äusseren Luft in Verbindung steht. Wenn der Kolben auf diese Weise am unteren Ende seines Weges angekommen ist, so erhält er wieder eine aufsteigende Bewegung; das Ventil *d* schliesst sich, während sich das Ventil *a* öffnet, und der Vorgang wiederholt sich nun ganz so, wie wir es schon beschrieben haben.

Das Ventil *a* ist an einem Stab *b* befestigt, der mit einiger Reibung durch den Kolben B hindurchgeht. In Folge dieser Einrichtung sucht der Kolben, so lange er in die Höhe geht, das Ventil *a* zu heben und hierauf wieder zu senken, wenn er sich wieder abwärts bewegt; aber der Stab *b* ist an seinem oberen Theil mit einem Ansatz *c* versehen, der ihn verhindert, der aufsteigenden Bewegung des Kolbens ganz zu folgen; auf diese Weise kann sich das Ventil *a* nur um eine geringe Grösse heben und wieder senken. In dem Augenblick, wo der Kolben seine auf- oder seine absteigende Bewegung beginnt, öffnet oder schliesst sich das Ventil *a*; dann aber bleibt es unbeweglich, und während der Kolben seine Bewegung fortsetzt, gleitet die Stange *b* durch ihn hindurch. Es war von Wichtigkeit, dem Ventil *a* die eben beschriebene Einrichtung zu geben; denn gegen das Ende der

Operation wird der Unterschied zwischen der Spannkraft der unter dem Kolben befindlichen Luft und der Spannkraft der Luft im Recipienten so gering, dass man nicht darauf rechnen darf, dass das Ventil durch ihn allein im passenden Moment geöffnet oder geschlossen wird.

Der Hahn F ist mit zwei Bohrungen versehen: mit einer geradlinigen *e* und mit einer krummen, die, nach auswärts gehend, mit einem Stifte *f* verschlossen werden kann. Während des Auspumpens steht die Bohrung *e* in der Richtung des vertikalen Kanals, welcher oben im Mittelpunkte des Tellers E E endigt. Wenn darauf der Recipient hinlänglich luftleer gemacht ist, so schliesst man den Hahn, indem man ihn um 90 Grad dreht, um alle Verbindung des Recipienten mit dem Kanal C C und dem Pumpenstiefel zu unterbrechen. Wenn man in der Stellung des Hahnes, wie er in der Figur gezeichnet ist, den Stift *f* herauszieht, so kann die Luft durch die bereits erwähnte krumme Bohrung des Hahns in dem Recipienten eindringen.

Mit dem Kanal C C steht gewöhnlich eine weite, oben geschlossene Glasröhre G in Verbindung; dieselbe enthält die sog. B a r o m e t e r p r o b e, eine Vorrichtung, welche dazu bestimmt ist, die Spannkraft der Luft im Kanal C C und foglich auch im Recipienten in jedem Augenblick während des Fortgangs der Operation messen zu können. Diese Barometerprobe besteht aus nichts weiter als aus einem Heberbarometer (§. 302), dessen langer, oben geschlossener Schenkel bedeutend abgekürzt ist, sodass das Quecksilber in demselben bis oben ansteht. Erst nachdem das Auspumpen bis auf einen gewissen Grad fortgeschritten ist, beginnt das Quecksilber in dem geschlossenen Schenkel der Barometerprobe zu sinken und der Höhenunterschied der Quecksilberspiegel im offenen und geschlossenen Schenkel gibt jeden Augenblick die Spannkraft der Luft im Recipienten. Das Barometer ist abgekürzt, weil es erst dann von Interesse ist, den Druck der Luft im Innern kennen zu lernen, wenn er schon ziemlich schwach im Verhältniss zum Druck der atmosphärischen Luft geworden ist.

Es ist leicht zu sehen, auf welche Weise sich die Spannkraft der Luft im Recipienten allmählich vermindert, wenn die Pumpe in Thätigkeit gesetzt wird. Nehmen wir z. B. an, dass der Rauminhalt desjenigen Theils des Pumpenstiefels, der sich unter dem Kolben befindet, wenn derselbe seinen höchsten Stand erreicht hat, der dritte Theil von dem des Recipienten D und des Kanals C C zusammen genommen sei. Wenn der Kolben unten

im Pumpenstiefel steht und sich hierauf bis zu dem obersten Punkte seines Weges erhebt, so wächst das Volumen der in dem Recipienten D und dem Kanal C C enthaltenen Luft im Verhältniss von 3 zu 4; die Spannkraft dieser Luft wird also $^3/_4$ mal so gross als sie ursprünglich war. Wenn sich hierauf der Kolben senkt, so erleidet die Spannkraft der Luft im Recipienten keine Aenderung. So hat also jeder Hub des Kolbens die Wirkung, die Spannkraft der Luft im Recipienten auf $^3/_4$ von derjenigen, welche sie vorher hatte, zu vermindern. Nach dem ersten Kolbenhub ist folglich diese Spannkraft $^3/_4$ von der der atmosphärischen Luft; nach dem zweiten ist sie blos noch $^9/_{16}$ davon, nach dem dritten $^{27}/_{64}$ u. s. f. Man sieht also, dass wie viel Kolbenzüge auch gemacht werden mögen, doch immer noch Luft im Recipienten bleibt; aber die Spannkraft dieser Luft kann in dieser Hinsicht so klein gemacht werden, als man will.

Das, was wir eben gesagt haben, setzt voraus, dass jedesmal, wenn sich der Kolben bis zu seinem tiefsten Stand im Stiefel herab bewegt, alle Luft, die sich unter ihm befindet, gezwungen wird, das Ventil *d* zu öffnen und durch den Kolben hindurch in die atmosphärische Luft zu strömen. Aber es ist unmöglich, diese Bedingung vollständig zu befriedigen: wenn der Kolben an der tiefsten Stelle seines Weges angekommen ist, so bleibt immer noch etwas Luft unter ihm. Daraus folgt, dass bei der aufsteigenden Bewegung des Kolbens nicht so viel Luft aus dem Recipienten in den Stiefel tritt, als es ohne dieses der Fall sein würde; denn die Luft, welche unter dem Kolben geblieben ist, dehnt sich, um sich mit dem Drucke der Luft im Recipienten in's Gleichgewicht zu setzen, aus und nimmt in Folge dessen einen beträchtlichen Raum des Pumpenstiefels ein. Der schädliche Einfluss des Umstandes, von dem wir sprechen, macht sich um so mehr fühlbar, je mehr die Spannung im Recipienten vermindert wird; es kommt wie leicht zu sehen im Verlauf des Auspumpens sogar so weit, dass jener Einfluss es ganz und gar verhindert, die Spannung noch weiter zu vermindern, sodass die Verdünnung der Luft im Recipienten nicht über eine gewisse Grenze hinausgetrieben werden kann. Man nennt desshalb den Raum, in welchem sich die Luft unter dem Stiefel befindet, wenn dieser seinen tiefsten Standpunkt einnimmt, den schädlichen Raum, und man muss bei der Construktion einer Luftpumpe besonders darauf sehen, dass derselbe so klein als möglich wird, d. h. dass sich die untere Fläche des Kolbens so dicht als möglich an den Boden des Stiefels anlegt. Es ist übrigens nicht schwer,

den schädlichen Raum so klein zu machen, dass, was ihn anbetrifft, das Auspumpen sehr weit, bis auf etwa $^1/_{10}$ Linie Quecksilberdruck der noch im Recipienten enthaltenen Luft getrieben werden könnte. Aber bei weitem grössere Schwierigkeiten, die Verdünnung so weit zu treiben, stellen die Unvollkommenheiten der Bearbeitung der Maschine entgegen. Der Verschluss der Hähne und Ventile, der Sitz des Recipienten auf dem Teller und der Anschluss des Kolbens an dem Stiefel kann selbst bei aller möglichen Sorgfalt nie vollkommen luftdicht hergestellt werden; und der Einfluss dieser Umstände beträgt weit mehr als der des schädlichen Raumes; ihnen ist es hauptsächlich zuzuschreiben, dass die Verdünnung selbst mit den besten Pumpen noch nicht weiter als bis höchstens $^1/_{500}$ bis $^1/_{600}$ getrieben werden konnte.

Die Luftpumpe, welche im Jahre 1650 von *Otto v. Guerike*, Bürgermeister von Magdeburg, erfunden wurde, bestand anfangs nur aus einer einzigen Saugpumpe, wie wir sie soeben beschrieben haben. Aber das Pumpen mit derselben war sehr mühsam, besonders wenn die Verdünnung der Luft im Recipienten schon weit vorgeschritten war, denn bei jedem Aufzuge des Kolbens ist der Druck der atmosphärischen Luft, welche auf seine obere Fläche ausgeübt und durch den viel geringeren Druck auf seine untere Fläche nur theilweise aufgehoben wird, zu überwinden. Um daher das Geschäft des Auspumpens zu erleichtern, wendet man jetzt meistens zwei Saugpumpen zugleich an, deren Kolben zu gleicher Zeit aber in entgegengesetzter Richtung mittelst eines Zahnrades, welches in ihre gleichfalls gezahnten Stangen eingreift, in Bewegung gesetzt werden (Fig. 570). Diese beiden Kolben erfahren, einer wie der andere, den Druck der atmosphärischen Luft auf ihre oberen Flächen und üben daher auf das Zahnrad zu beiden Seiten von oben nach unten Zugkräfte aus; aber diese beiden Kräfte halten sich an dem Zahnrade das Gleichgewicht, und das gleichzeitige Bewegen beider Kolben ist daher nicht schwieriger, als wenn der Druck der atmosphärischen Luft nicht auf sie wirken würde. Es sind nur noch die Widerstände zu überwinden, welche aus der Verschiedenheit der Drückungen, die von unten nach oben auf die unteren Flächen der beiden Kolben ausgeübt werden, entspringen. Die beiden Pumpenstiefel stehen mit einem gemeinschaftlichen Kanal in Verbindung der, anfangs horizontal laufend, sich bald vertikal erhebt, um sich im Mittelpunkt des Tellers zu endigen, gerade so wie bei der einstiefeligen Pumpe.

§. 442. **Saugmaschinen.** — Wir haben oben (§. 317) ein Mittel angegeben, durch welches eine künstliche Lüftung der Bergwerke hervorgebracht wird und welches darin besteht, dass man oben in einem Schachte Feuer anmacht, um durch die dadurch hervorgebrachte Temperaturdifferenz einen Luftstrom hervorzubringen. Aber man bedient sich zu demselben Zweck auch besonderer Maschinen, die dazu bestimmt sind, die Luft im Innern eines Bergwerkes in Bewegung zu setzen.

Damit eine Erneuerung der inneren Luft stattfinden kann, ist es nothwendig, dass der zu lüftende unterirdische Raum durch zwei verschiedene Kanäle mit der äusseren Luft communicirt, sei es nun durch zwei besondere Schächte, sei es durch zwei Theile eines und desselben Schachtes, welche man durch eine Scheidewand, welche sich seiner ganzen Tiefe nach erstreckt, von einander isolirt hat. Die Bewegung, welche hervorgebracht werden soll, hat zum Zweck, die atmosphärische Luft in einem der beiden Schächte, vorausgesetzt, dass deren zwei vorhanden sind, niedersteigen zu machen, sie hierauf durch die verschiedenen Theile des Bergwerks, welches gelüftet werden soll, hindurch zu führen, um sie endlich zu veranlassen, durch den anderen Schacht wieder aufwärts zu steigen. Um diesen Zweck zu erreichen, wendet man häufig Saugmaschinen an, welche man an der Mündung des Schachtes, durch welchen die innere Luft ausströmen soll, aufstellt; es sind diese Maschinen nichts anderes als Luftpumpen, nur mit dem Unterschiede, dass sie eine grosse Menge Luft aus dem Schachte heraufziehen, dagegen nur eine geringe Verdünnung derselben hervorbringen sollen. In dem Maasse als die Maschine arbeitet, kommt die Luft des Bergwerkes in Bewegung, um den luftverdünnten Raum, welchen jene herzustellen sucht, immer wieder auszufüllen, und daraus folgt eine fortwährende Circulation der Luft.

Diese Saugmaschinen besitzen im Wesentlichen dieselbe Einrichtung wie die Luftpumpen. Sie bestehen aus weiten, oben offenen Cylindern, in deren Boden mit Ventilen versehene Oeffnungen angebracht sind und in welchen sich Kolben bewegen, die gleichfalls von Oeffnungen mit Ventilen durchdrungen werden. Wir wollen hier indessen eine etwas andere Einrichtung angeben, die namentlich in den Bergwerken des Harzes häufig angewandt wird und den Zweck hat, die Reibung des Kolbens an den Wänden des Cylinders fast vollständig zu vermeiden. Zwei cylindrische Glocken A, A′ (Fig. 572) sind mittelst der Ketten C, C′ an den beiden Enden eines Balanciers B aufgehängt. Durch die oscil-

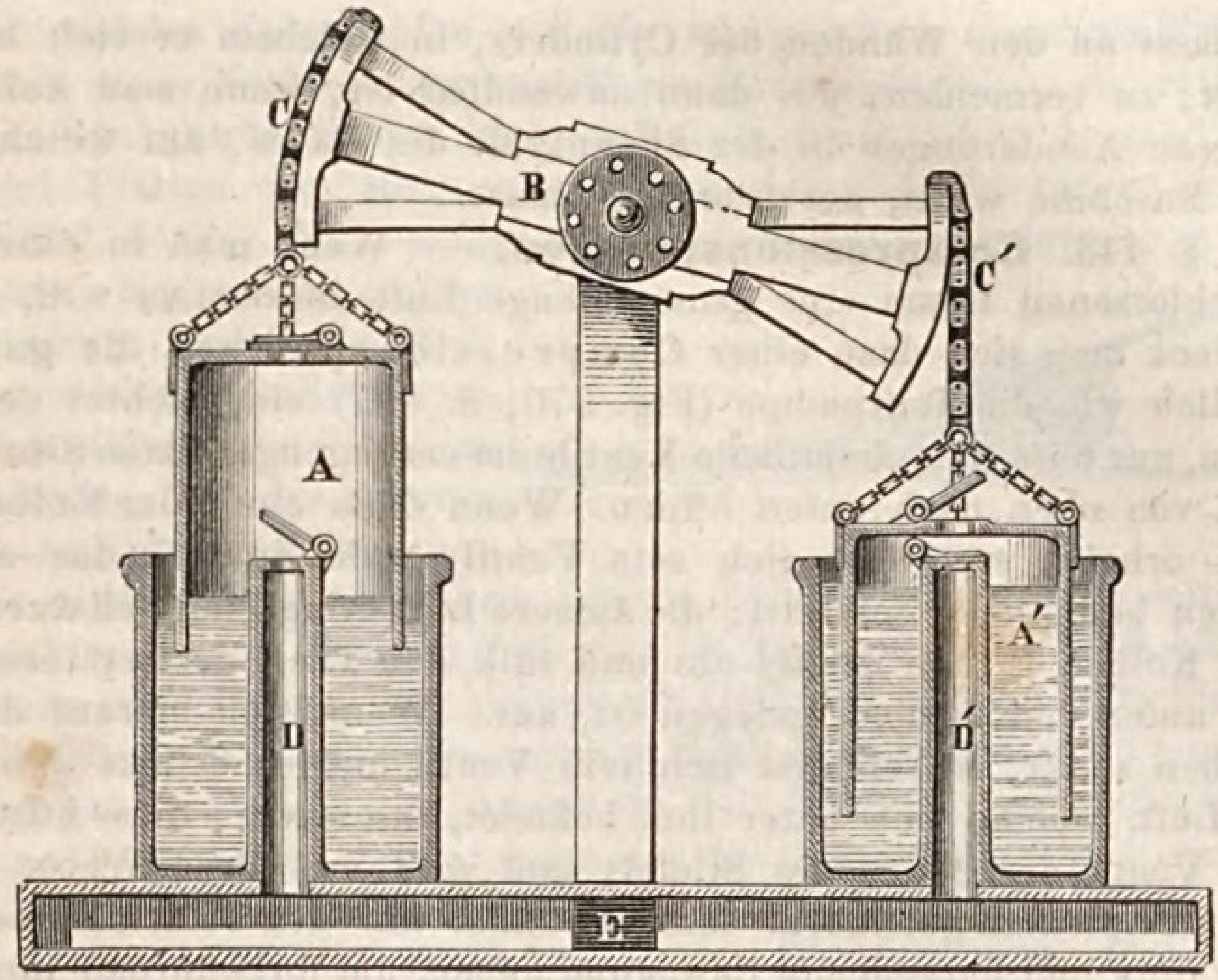


Fig. 572.

lirende Bewegung des Balanciers wird jede der beiden Glocken, welche in Kufen, die mit Wasser gefüllt sind, eintauchen, abwechselnd gehoben und gesenkt. Inmitten jeder dieser Kufen erheben sich zwei Röhren D, D′ bis über die Oberfläche des Wassers, während sie an ihrem unteren Theile mit einem Kanale E in Verbindung stehen, durch welchen die Luft aus dem Bergwerk gesaugt werden soll; die obere Oeffnung jeder dieser Röhren ist durch ein Ventil geschlossen, das sich von unten nach oben öffnet. Ausserdem besitzen die Glocken A, A′ oben Oeffnungen, die mit Ventilen versehen sind, welche sich in demselben Sinne öffnen. Wenn eine der Glocken, A, sich hebt, so schliesst sich ihr Ventil und die Luft der Grube strömt durch die Röhre D, deren Ventil geöffnet ist, in die Glocke. Wenn sich hierauf diese Glocke senkt, so schliesst sich das Ventil der Röhre D, dasjenige der Glocke öffnet sich und die in ihr enthaltene Luft wird in's Freie geschafft. Die Oberfläche des Wassers steht in der Glocke und ausserhalb derselben nicht in gleicher Höhe, da die Spannkraft der in der Glocke enthaltenen Luft bald grösser, bald kleiner als die der atmosphärischen Luft ist. Aber diese Aenderungen in der Spannkraft sind so gering, dass daraus keine erheblichen Unterschiede im Niveau der Flüssigkeit entstehen. Man sieht daraus übrigens, dass dieses Mittel, die Reibung eines

Kolbens an den Wänden des Cylinders, in welchem er sich bewegt, zu vermeiden, nur dann anwendbar ist, wenn man keine grossen Aenderungen in der Spannkraft des Gases, auf welches die Maschine wirkt, hervorbringen muss.

§. 443. **Compressionspumpen.** — Wenn man in einem geschlossenen Raum eine grosse Menge Luft ansammeln will, so bedient man sich dazu einer Compressionspumpe, die ganz ähnlich wie die Luftpumpe (Fig. 570, S. 865) eingerichtet sein kann, nur dass sich sämmtliche Ventile im entgegengesetzten Sinne, d. h. von oben nach unten öffnen. Wenn dann einer der Kolben sich erhebt, so öffnet sich sein Ventil, während sich das am Boden befindliche schliesst; die äussere Luft dringt folglich durch den Kolben in den Stiefel ein und füllt den Theil des letzteren, der unter dem Kolben gelegen ist, aus. Wenn sich hierauf der Kolben senkt, so schliesst sich sein Ventil und er drückt daher die Luft, welche sich unter ihm befindet, zusammen; diese öffnet das Ventil am Boden des Stiefels und wird auf diese Weise in den Recipienten getrieben. Man darf also nur den beiden Kolben eine hin- und hergehende Bewegung geben, um fortwährend neue Quantitäten Luft in den Recipienten zu treiben, der natürlich jetzt gut auf dem Teller befestigt sein muss, um dem Druck der inneren Luft widerstehen zu können. Die Barometerprobe der Luftpumpe wird nun durch ein Manometer mit verdichteter Luft ersetzt, welches dazu dient, jeden Augenblick die Spannkraft des inneren Gases messen zu können.

Mittelst einer ähnlichen Maschine wie die, welche wir soeben beschrieben haben, nur dass sie zu einer einfachen einstiefeligen Druckpumpe vereinfacht ist, comprimirt man die Luft in dem Kolben der Büchsen, welche unter dem Namen Windbüchsen bekannt sind. Diese Luft ist dazu bestimmt, das Pulver zu ersetzen und dem Geschosse, welches man in den Lauf gebracht hat, den nöthigen Anstoss zu ertheilen. Wenn man die Kugel abschiessen will, so darf man nur mittelst eines Drückers ein Ventil, das in dem Kolben angebracht ist, öffnen und eine gewisse Menge Luft austreten lassen; diese Luft, welche nirgends anders als durch den Lauf der Büchse entweichen kann, treibt die vorher in denselben eingebrachte Kugel vor sich her und ertheilt ihr dadurch die entsprechende Geschwindigkeit.

§. 444. **Blasbälge.** — Die Blasbälge, deren man sich bedient, um das Feuer auf den Küchenheerden, in den Oefen, ja auch in den Essen der Schmieden anzublasen, sind nichts anderes als Maschinen, welche dazu bestimmt sind, die Luft aus der

Atmosphäre zu schöpfen und sie mit gewisser Geschwindigkeit durch die in Verbrennung begriffenen Brennmaterialien zu treiben.

Ein gewöhnlicher, kleiner Küchenblasbalg besteht aus zwei Platten von Holz, von denen sich jede in einen Handgriff A, B (Fig. 573) endigt, und welche mit einander durch ein Stück biegsamen Leders vereinigt sind, das einen abgeschlossenen Raum zwischen ihnen herstellt. Eine Oeffnung D in der unteren dieser Platten ist von innen mit einem Stück biegsamen Leders bedeckt, das nur in einigen Punkten seines Umfangs befestigt ist und eine Art Ventil bildet. Dieses Stück Leder legt sich an die Oeffnung an und verschliesst sie vollständig, wenn die innnere Luft auszutreten sucht; wenn dagegen die Luft von aussen in den Blasbalg durch die Oeffnung D eintreten will, so kann sie das Lederstück leicht emporheben und sich dadurch die Oeffnung frei machen. Nach vorn verlängert sich der Blasbalg in eine leicht konisch zulaufende Röhre F, Düse genannt; durch diese Röhre soll die Luft von innen nach aussen getrieben werden. Um den Blasbalg in Thätigkeit zu setzen, ergreift man jede der Handhaben A, B mit einer Hand und bewegt die B so, dass sie sich abwechselnd von der A entfernt und wieder derselben nähert. In Folge dieser Bewegung wird der innere Raum C einmal vergrössert und dann wieder verkleinert. Wenn sich dieser Raum vergrössert, so bildet sich ein luftverdünnter Raum im Innern und die atmosphärische Luft dringt daher durch die Oeffnungen D, F, besonders aber durch die D, welche breiter ist, ein. Wenn sich im Gegentheile die beiden Handgriffe A, B einander nähern, so wird die innere Luft zusammengedrückt, und da sie durch die Oeffnung D, welche sich schliesst, nicht mehr austreten kann, so wird sie gezwungen, allein durch die Düse F auszuströmen.

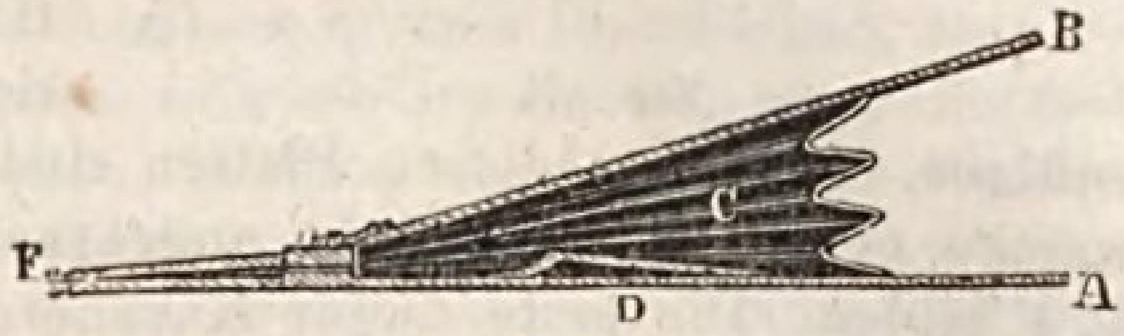


Fig. 573.

Bei dem Blasbalg, von dem wir eben gesprochen haben, tritt der Luftstrahl aus der Düse nur intermittirend aus; ja noch mehr, zur Zeit, wo derselbe saugt, sucht die äussere Luft ebensowohl durch die Düse F als durch die Oeffnung D einzudringen, wodurch es sogar kommen kann, dass die Flamme durch die Düse hereinschlägt und im Innern des Blasbalges fortbrennt. Um diese beiden Uebelstände zu vermeiden, hat man die sog. Blasbälge mit doppeltem Wind erdacht. Dieselben werden namentlich in grösseren Dimensionen ausgeführt, in Schmieden zum Anblasen

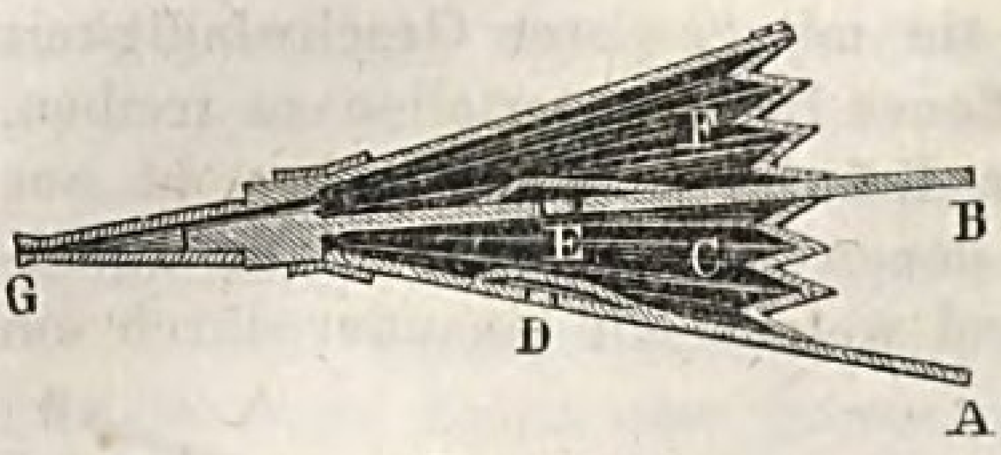


Fig. 574

des Feuers in der Esse angewandt; die Figur 574 stellt nur ein kleines Exemplar eines solchen dar. Er besteht aus drei Platten von Holz, von denen blos zwei sich in Handhaben A, B endigen. Zwischen diesen Platten sind wieder, wie vorhin, zwei weiche gefaltete Lederstücke angebracht, welche zwei Kammern C, F bilden. Die erste dieser Kammern, C, communicirt mit der äusseren Luft durch eine Oeffnung D, welche mit einem Lederventil, ähnlich dem, wie wir es vorhin schon beschrieben haben, versehen ist; ausserdem steht sie mit der zweiten Kammer F durch eine Oeffnung E, die gleichfalls ein Ventil derselben Art bedeckt, in Verbindung. An dem vorderen Ende dieser zweiten Kammer befindet sich ein Kanal, der in eine konische Röhre G, die Düse, endigt, durch welche die Luft hinausgetrieben werden soll. Wenn man die beiden Handhaben A, B von einander entfernt, so schliesst sich das Ventil E, das Ventil D aber öffnet sich und die äussere Luft dringt in die Kammer C. Wenn man hierauf die beiden Handhaben A, B wieder nähert, so schliesst sich das Ventil D, das Ventil E dagegen öffnet sich und die Luft geht von C nach F über. Eine kleine, innen angebrachte Feder, welche bei grösseren Blasbälgen durch Gewichte, die auf der obersten Platte liegen, ersetzt wird, sucht die beiden hölzernen Platten, welche die Kammer F einschliessen, fortwährend einander zu nähern. Zur Zeit, wo die Luft von C nach F übergeht, gibt diese Feder nach und gestattet so dem Raum F, sich zu vergrössern und die Luft in sich aufzunehmen; aber durch die Gegenwirkung, welche die Feder ausübt, wird diese Luft in F zugleich comprimirt und durch die Düse G ausgetrieben. Wenn man auf diese Weise fortfährt, die Handhaben A, B zu bewegen, indem man sie abwechselnd von einander entfernt und einander wieder nähert, so gelangen immer wieder neue Quantitäten Luft von C nach F, ohne dass die Gegenwirkung der Feder Zeit gehabt hätte, die ganze schon vorher in die zweite Kammer F eingeführte Luft auszutreiben. Der Ausfluss der Luft durch die Düse G erfährt also keine Unterbrechung und der austretende Gasstrahl besitzt eine um um so grössere Regelmässigkeit, je schneller die Bewegung der beiden Handhaben ist, in je engere Grenzen also die Aenderungen der Spannkraft der in F enthaltenen Feder eingeschlossen werden.

§. 445. **Gebläse.** — Um die Luft mit einem gewissen Drucke in die grossen Feuer der Essen und Oefen, wie sie namentlich auf den Hüttenwerken zur Anwendung kommen, zu treiben, wendet man sog. Gebläse von verschiedener Form an, welche durch Wasserräder oder Dampfmaschinen in Bewegung gesetzt werden. Diese bestehen manchmal aus grossen Blasebälgen, ähnlich denjenigen, welche wir soeben beschrieben haben; ein andermal sind es Maschinen mit Kolben, welche die Luft durch Ventile auf der einen oder anderen Seite einsaugen und beim Rückgang durch Ventile, welche sich in entgegengesetzter Richtung öffnen, in die Röhrenleitung treiben. Solche Gebläse heissen dann gewöhnlich Cylindergebläse. Sie nehmen die Luft aus der Atmosphäre und drücken sie in gewisse Röhren, in welchen sie zu verschiedenen Oeffnungen (Düsen) geleitet wird, aus denen sie ausströmen soll. Da die Regelmässigkeit, mit welcher die Luft aus diesen Oeffnungen bläst, meistens von grosser Wichtigkeit für den Fortgang der in den Oefen vorzunehmenden Operationen ist, so wendet man zur Erreichung dieser Regelmässigkeit häufig ein ähnliches Mittel an wie das, welches wir bei dem Blasbalg mit doppeltem Winde hervorgehoben haben. Dieses Mittel besteht darin, dass man auf dem Wege, welchen die Luft nach ihrem Austritt aus der Maschine zu durchlaufen hat, einen cylindrischen Behälter (Fig. 575) anbringt, in welchem sich ein Kolben befindet, der mit Gewichten belastet ist, und der zwischen den Wänden des Behälters frei auf- und abwärts gleiten kann. Die von dem Gebläse gelieferte Luft gelangt auf der einen Seite in diesen Behälter und tritt auf der andern wieder aus. Zur Zeit, wo eine grosse Menge von Luft in dem Zwischenreservoir ankommt, erhebt sich der Kolben; er senkt sich dagegen, wenn die Luft in geringerer Menge einströmt; die Spannkraft der Luft unter dem Kolben des Regulators ist also sehr nahezu immer die nämliche, und folglich ändert sich auch die Geschwindigkeit, mit welcher die Luft aus dem Regulator tritt, kaum merklich.

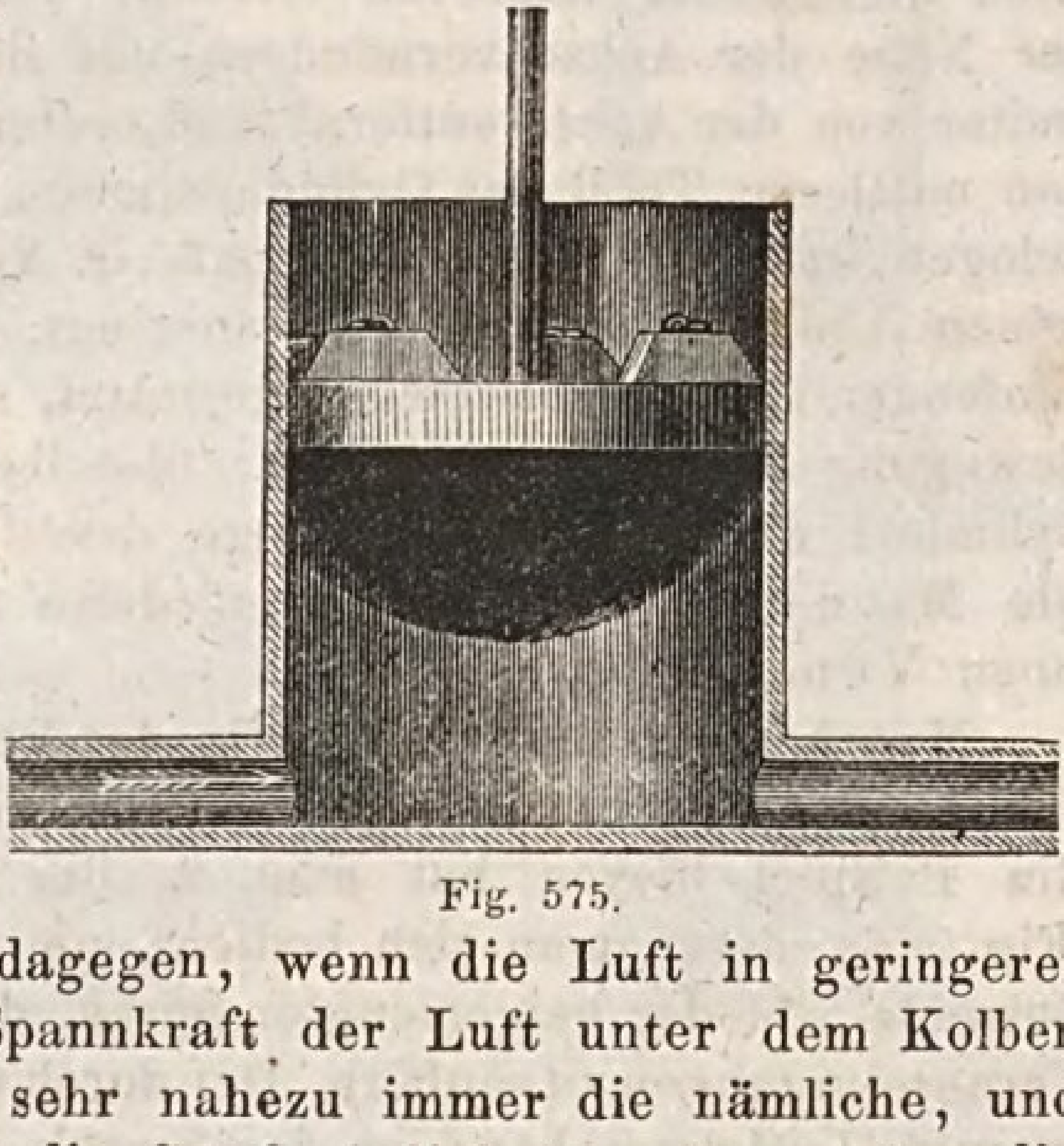


Fig. 575.

Man bedient sich der Gebläse auch häufig zur Hervorbringung des Luftwechsels in den Bergwerken. Zu diesem Zweck stellt man eine Maschine dieser Art an der Mündung des Schachtes auf, durch welchen man die aus der Atmosphäre entnommene Luft abwärts steigen machen will, um einen Luftstrom hervorzubringen, der die unterirdischen Gänge durchzieht und durch einen anderen Schacht wieder emporsteigt. Aber die Gebläse, welche zur Lüftung in den Bergwerken angewendet werden, unterscheiden sich von denen, welche zum Einblasen der Luft in die Feuerheerde dienen, darin, dass erstere eine grosse Menge Gas mit geringer Geschwindigkeit fortbewegen sollen, während letztere dazu bestimmt sind, einer viel kleineren Luftmenge eine bedeutende Geschwindigkeit zu ertheilen.

§. 446. **Ventilatoren.** — Nehmen wir an, dass man im Innern eines Cylinders eine Achse, auf welcher Flügel oder Schaufeln befestigt sind, schnell herumdrehe; die Flügel seien so angeordnet, dass sie die Luft, in welcher sie sich bewegen, in ihre Bewegung mit fortreissen; dann werden in dieser Luft, die auf diese Weise ebenfalls eine sehr schnelle Rotationsbewegung annimmt, Centrifugalkräfte entwickelt, welche sie von der Achse des Cylinders zu entfernen suchen, um sie an seinem Umfang anzuhäufen. Wenn der Cylinder von allen Seiten geschlossen ist, so kann der Druck der Luftmasse, welche er enthält, nicht an allen Stellen der nämliche bleiben; dieser Druck muss sich in der Nähe der Achse vermindern und dagegen in Punkten, die weiter von der Achse entfernt sind, vermehren. Wenn man daher den mittleren Theil des Cylinderraumes, der zunächst der Achse gelegen ist, mit der freien Luft in Verbindung setzt und an seinem Umfang eine Oeffnung anbringt, welche der dort sich anhäufenden Luft zu entweichen gestattet, so wird eine fortdauernde Bewegung der Luft hergestellt; dieselbe tritt an der Achse des Cylinders ein, um am Umfange desselben wieder auszutreten. Die Maschine, welche man auf diese Art erhält, nennt man einen Ventilator.

Manchmal sind die Schaufeln des Ventilators eben und nach den Radien des Cylinders gerichtet, in welchem sie sich bewegen. Ein Beispiel hievon hat man in der Getreideputzmühle (Fig. 576), deren man sich bedient, um das eben ausgedroschene Getreide von der beigemengten Spreu, dem Staube und sonstigen Verunreinigungen zu säubern. Der durch die Rotation der Schaufeln erzeugte Luftstrom hat hier den Zweck, den Staub und die Streu mit sich fortzureissen und sie auf diese Weise von den Körnern,

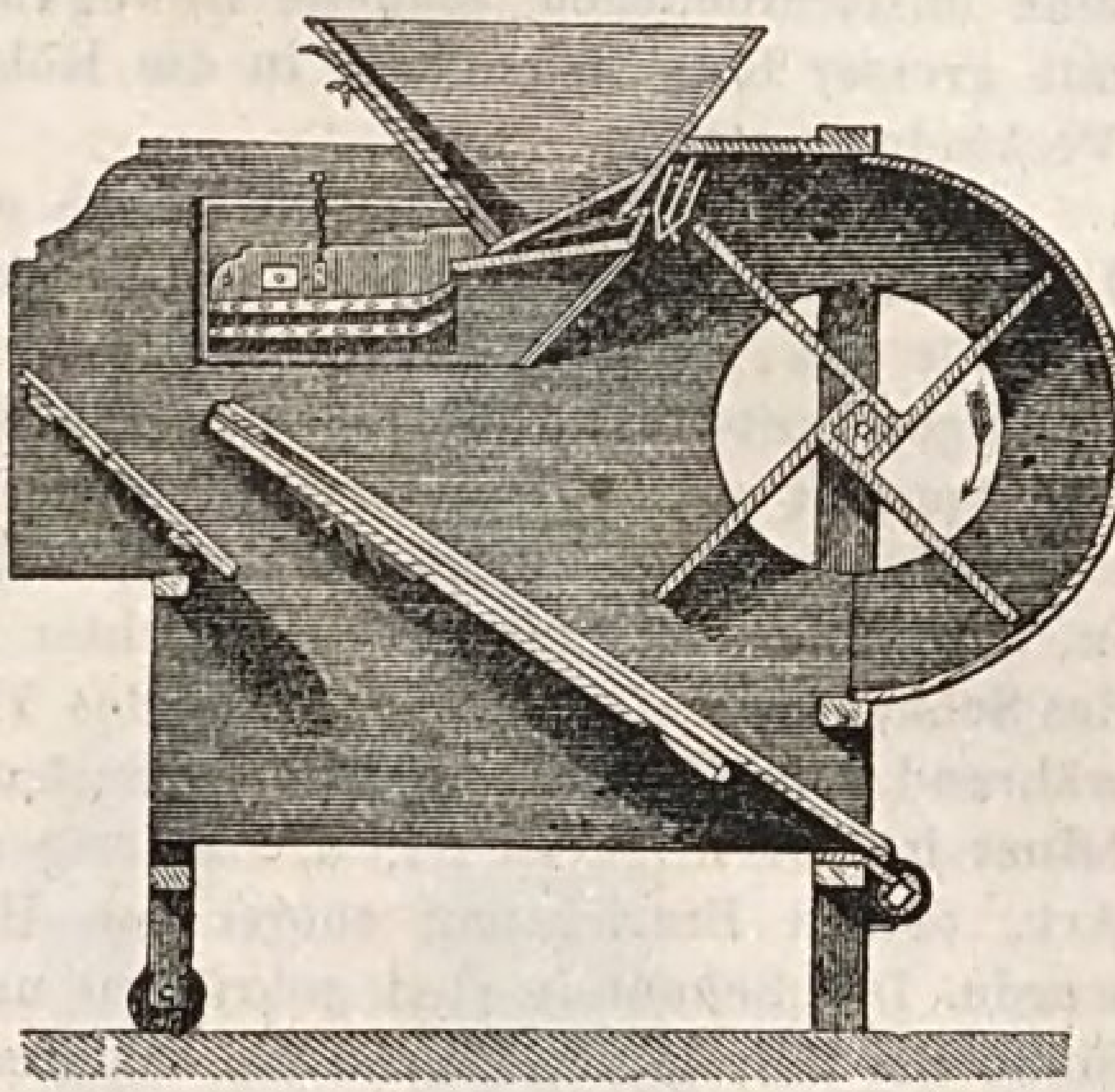


Fig. 576.

die ihm, da sie bei gleich grosser Oberfläche viel schwerer sind, nicht so leicht folgen können, zu trennen.

Die Figuren 577 und 578 zeigen den Ventilator, welcher gewöhnlich als Gebläse angewandt wird, um die Luft in die grossen Feuer der Essen und Oefen in Schmiedewerkstätten und Hüttenwerken einzublasen. Seine Schaufeln sind in dem entgegengesetzten Sinne von dem, in welchem sie sich bewegen, leicht gekrümmt, damit sie in dem Augenblicke, wo sie vor dem Ausblaserohr, das man oben in der Fig. 577 angebracht sieht, vorbeigehen, die Luft leichter entweichen lassen. Die Ventilatoren dieser Art erhalten gewöhnlich

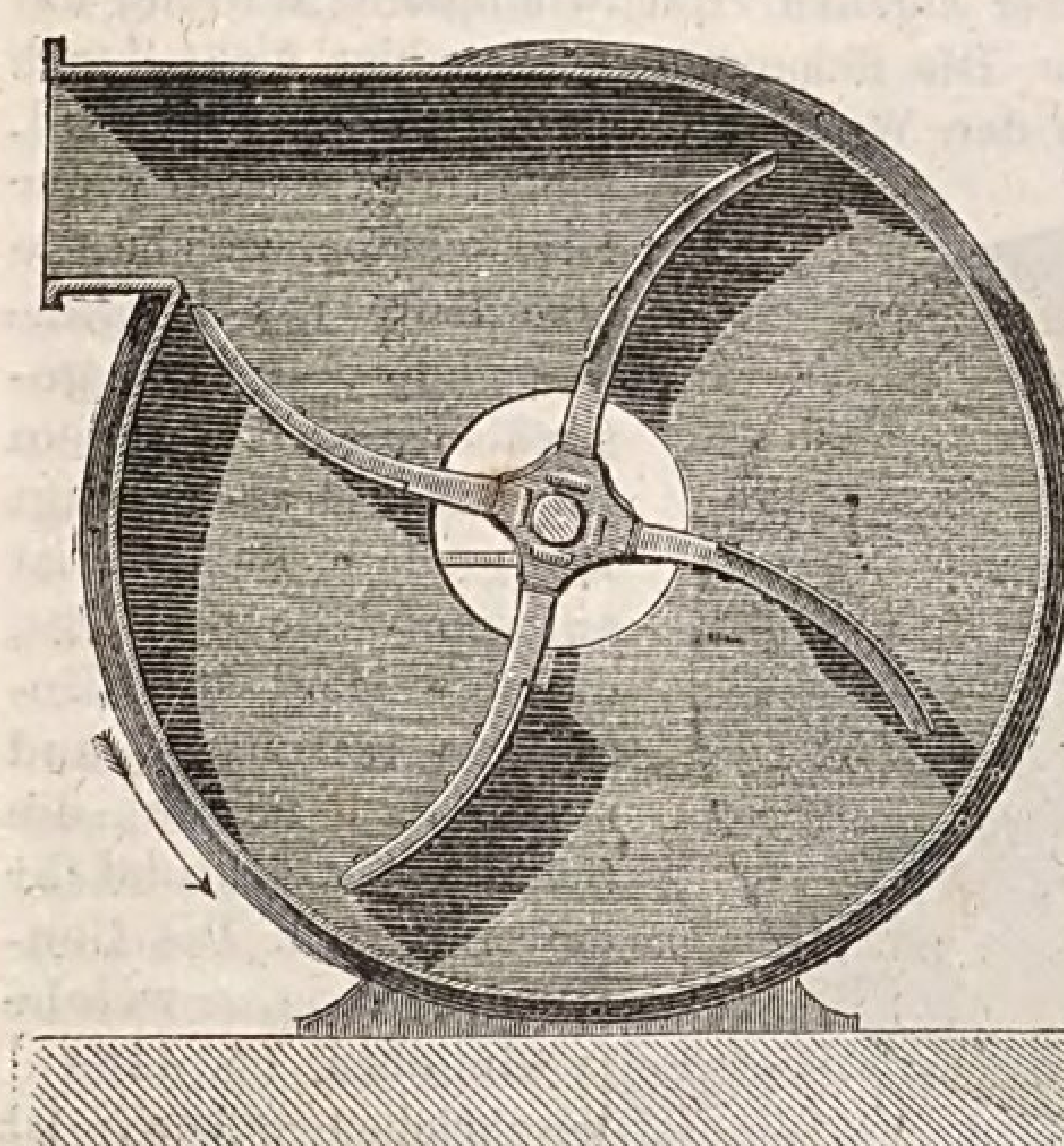


Fig. 577.

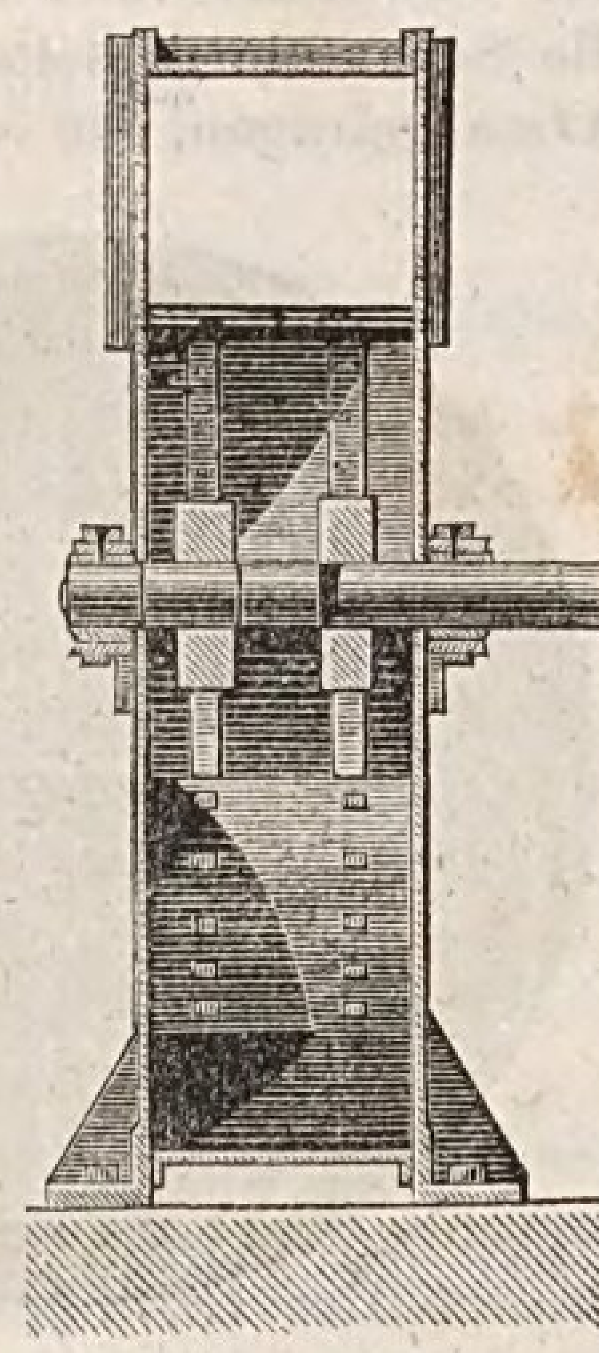


Fig. 578.

eine ausserordentlich schnelle Bewegung. Sie treiben die Luft mit grosser Regelmässigkeit in die Röhre, mit welcher sie in Verbindung stehen.

Man bedient sich manchmal auch eines Ventilators, um die Luft aus einem Schachte eines Bergwerks zu saugen und dadurch den für die Herstellung des Luftwechsels in der Grube nothwendigen Luftstrom hervorzurufen. Zu diesem Behufe bringt man den Apparat an der Mündung des Schachtes selbst oder auch an der Oeffnung eines weiten Kanals an, welcher mit diesem Schachte in Verbindung gesetzt ist, und richtet es so ein, dass die Luft des Schachtes frei nach der Mitte des Ventilators strömen kann, während sein Umfang nach allen Seiten in die Atmosphäre geöffnet ist. Die Figuren 579 u. 580 zeigen einen Ventilator dieser Art, dessen Einrichtung zuerst von Herrn *Combes* angegeben wurde. Die Schaufeln sind gekrümmt und im entgegengesetzten Sinne der Bewegung, welche sie erhalten, gerichtet. Diese Form der Schaufeln hat den Zweck, dass die Luft in dem Momente, wo sie aus der Maschine in die Atmosphäre übertritt, nur eine geringe Geschwindigkeit besitzt; die Luft gleitet an den Schaufeln im entgegengesetzten Sinne, in welchem sich diese bewegen; ihre absolute Geschwindigkeit nach dem Austritt aus der Maschine ist also nur gleich der Differenz zwischen der Geschwindigkeit des Ventilators und ihrer eigenen Geschwindigkeit in Bezug auf die Schaufeln desselben. Die Schaufeln werden hier nicht durch Arme getragen, die an der Welle des Ventilators befestigt sind, sondern sitzen auf einer Kreisscheibe, welche die eine Seite des Ventilators bildet, und der gegenüber die Luft aus dem Innern der Grube gesaugt wird; diese Scheibe ist an einer Welle befestigt, durch welche sie in Rotation versetzt wird und mit ihr natürlich die Schaufeln, welche auf ihr befestigt sind. Die Centrifugalpumpe, welche wir oben (§. 416) beschrieben haben, ist nichts anderes als der

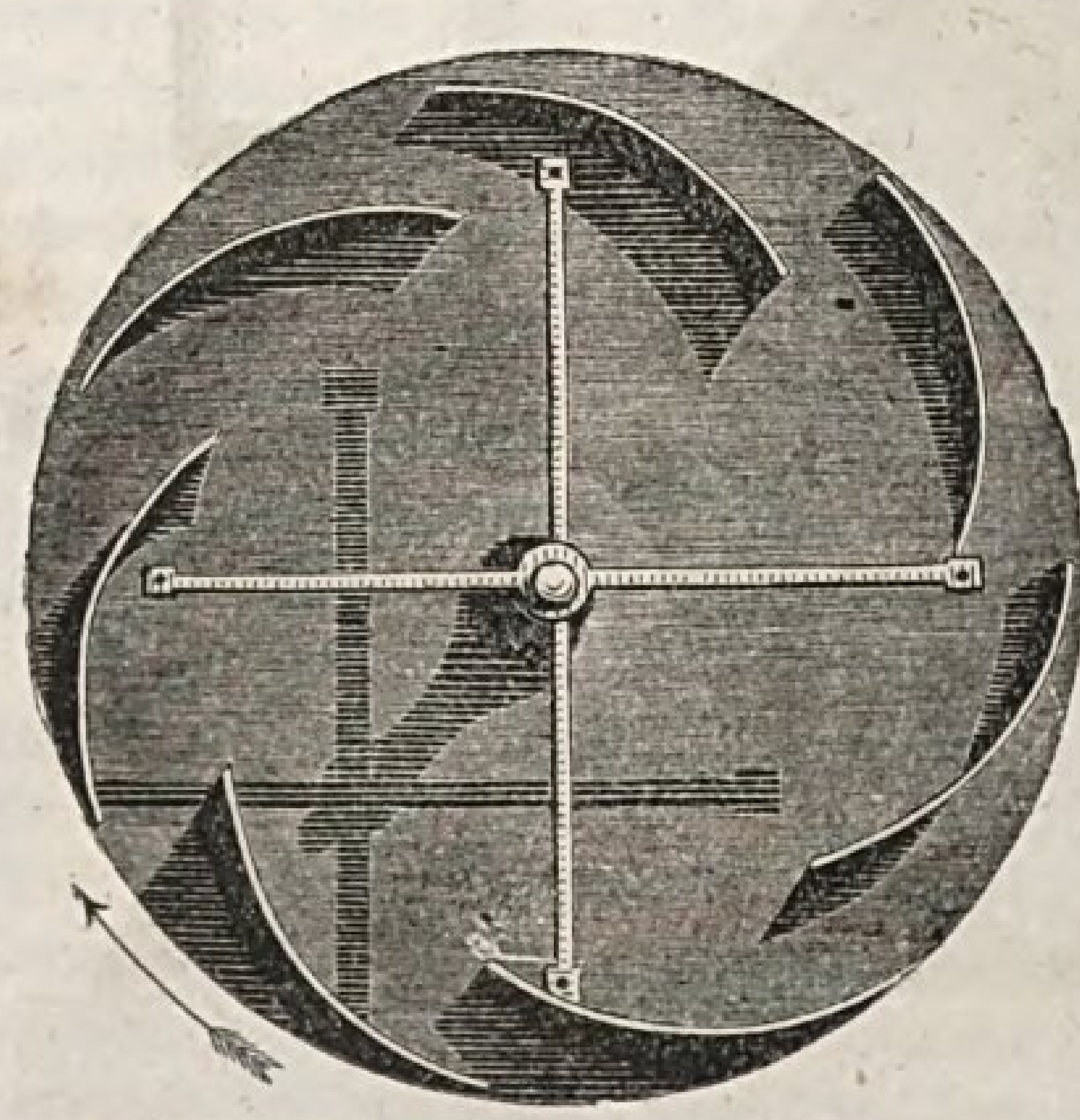


Fig. 579.

Ventilator von *Combes*, welchen man auf eine Flüssigkeit, anstatt auf ein Gas, wirken lässt.

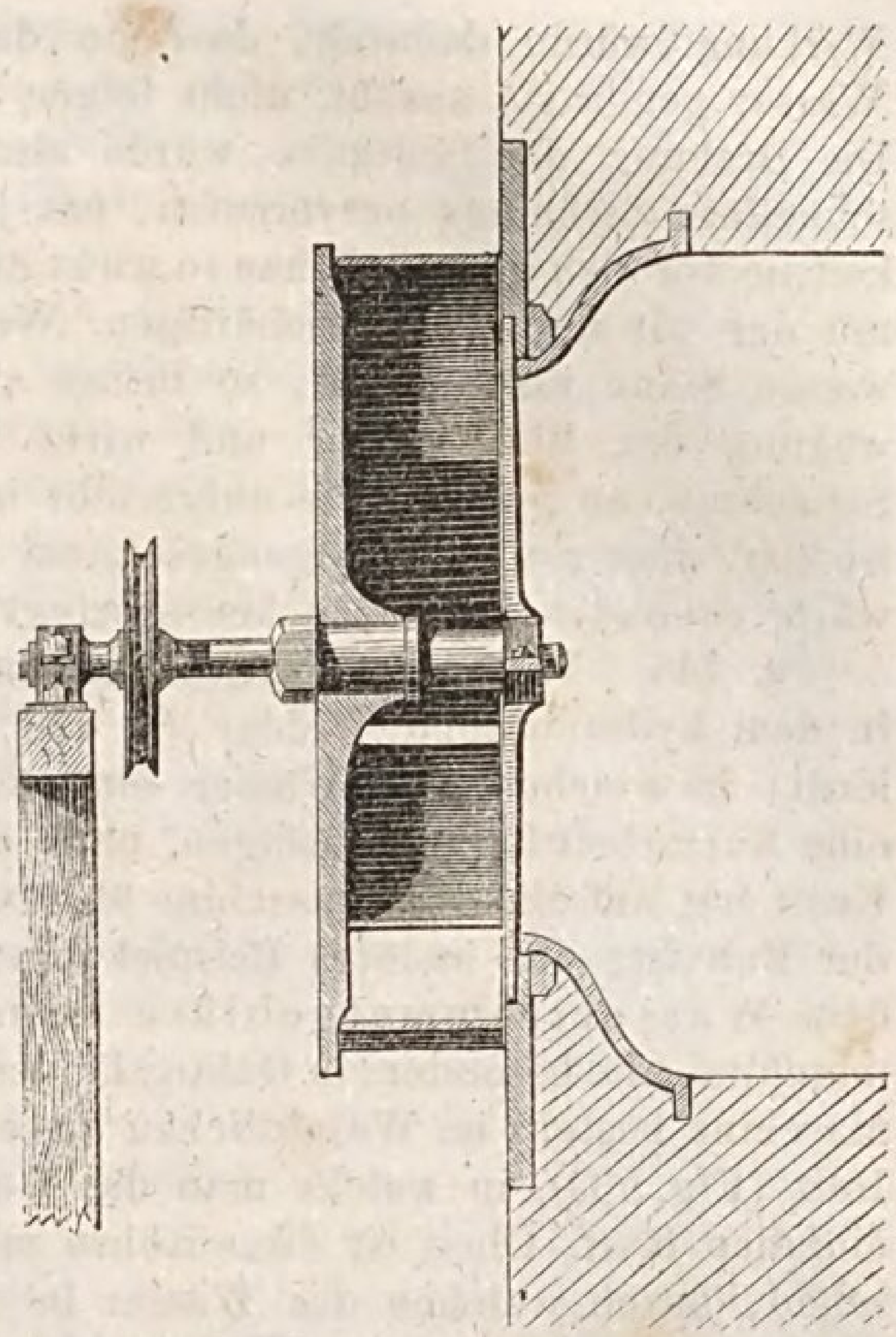


Fig. 580.

§. 447. **Pneumatische Schraube.** — Zur Herstellung des Luftwechsels in den Bergwerken bedient man sich auch manchmal des in Fig. 581 dargestellten Apparates, welcher aus einer Schraube mit grosser Ganghöhe und breiten Windungen besteht, die um eine vertikale Achse im Innern eines feststehenden Cylinders beweglich ist, welcher sie genau umschliesst. Diese Schraube, welche man p n e u m a t i s c h e S c h r a u b e nennt, hat in ihrer Form, grosse Aehnlichkeit mit der in Fig. 510 (Seite 760) abgebildeten Schraube und wirkt nahezu auf dieselbe Art. Die Schiffsschraube, indem sie sich in passendem Sinne dreht, ruft eine fortschreitende Bewegung des Schiffes hervor und gibt zu gleicher Zeit dem Wasser, welchem sie begegnet, eine Bewegung im entgegengesetzten Sinne. Wenn das Schiff vor Anker läge und dadurch in seiner Stellung festgehalten wäre, so könnte sich die Schraube, indem sie sich drehte, nicht fortbewegen; aber sie würde noch immer auf das Wasser wirken, und ihre

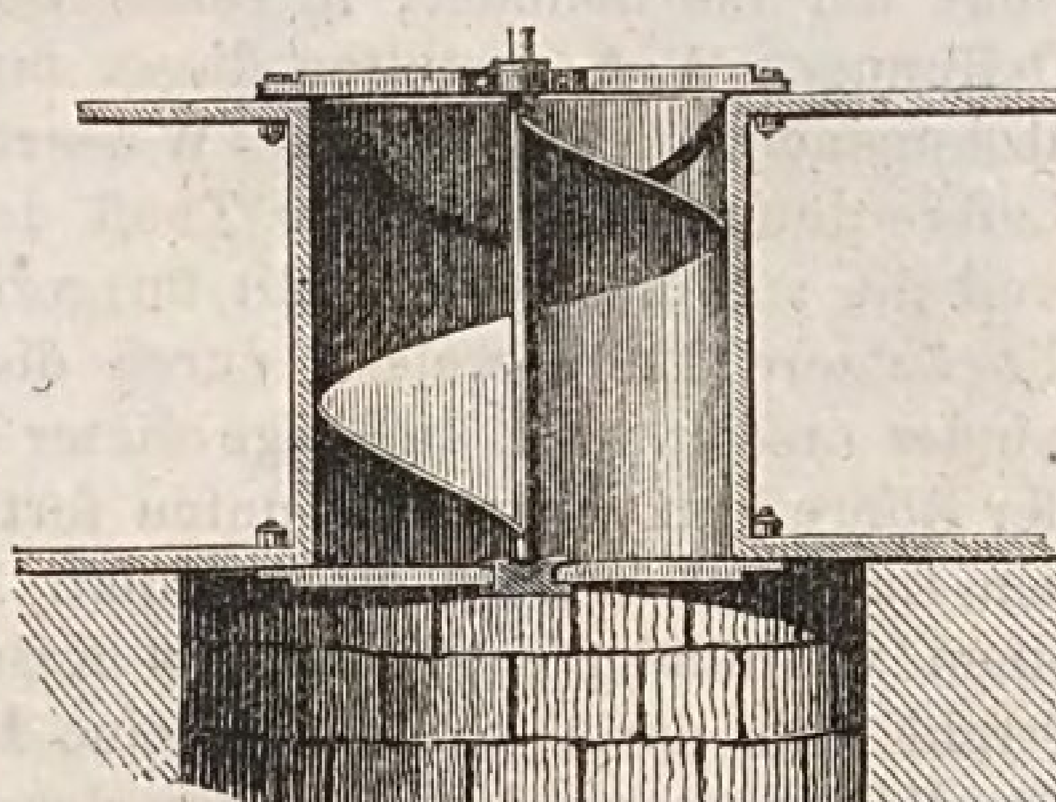


Fig. 581.

Wirkung würde dadurch, dass sie dem Drucke, welchen das Wasser gegen sie ausübt, nicht folgen kann, sogar noch erhöht. Die Drehung der Schraube würde also im Wasser eine um so schnellere Strömung hervorrufen, mit je grösserer Geschwindigkeit sie vor sich ginge. Genau so wirkt die pneumatische Schraube, mit der wir uns eben beschäftigen. Wenn man sie in einem gewissen Sinne rasch dreht, so bringt sie eine aufsteigende Bewegung der Luft hervor und wirkt so an der Mündung des Schachtes, an welcher sie aufgestellt ist, als Saugmaschine. Es ist klar, dass sie in entgegengesetztem Sinne gedreht, einen abwärts gehenden Luftstrom hervorbringt und als Gebläse wirkt.

§. 448. **Wassertrommelgebläse.** — Wir haben bereits in dem hydraulischen Widder (§. 439) ein Beispiel kennen gelernt, in welchem das Wasser eines Gefälles direkt wirkt, um eine Nutzarbeit hervorzubringen, ohne dass es nöthig wäre, seine Kraft erst auf eine Kraftmaschine überzutragen, wie es gewöhnlich der Fall ist; ein anderes Beispiel dieser Art wollen wir nun in dem Wassertrommelgebläse kennen lernen, eine Gebläsemaschine, die besonders in Gebirgsländern angewendet wird. Diese Maschine besteht im Wesentlichen aus einer vertikalen Röhre von Holz (Fig. 582), in welche man das Wasser aus dem oberen Bette einfallen lässt. Oben ist diese Röhre mit einer Art Trichter versehen, durch welchen das Wasser in sie eintritt; durch diesen Trichter ergiesst sich ein Flüssigkeitsstrahl, welcher oben nicht die ganze Weite der Röhre einnimmt und die Luft, welche sich rings um ihn befindet, in seiner Bewegung mit fortreisst. Die Oeffnungen A, A gestatten dieser inneren Luft in der That, der absteigenden Bewegung des Wassers zu folgen, ohne dass eine Luftverdünnung im oberen Theil der Röhre daraus entstünde, weil die auf diese Weise mit fortgerissene Luft unmittelbar durch die äussere Luft, welche durch die Oeffnungen A, A eintritt, wieder ersetzt wird. In Folge dieser Einrichtung wird das Innere der Röhre von oben nach unten fortwährend von einem Gemisch von Luft und Wasser durchströmt. Die Röhre mündet unten in einen vollständig geschlossenen Kasten B. Der herabfliessende Strahl fällt darin auf eine kleine Platte C, die dazu bestimmt ist, die Trennung der Luft von dem Wasser zu erleichtern. Die Luft sammelt sich oben in dem Kasten an und besitzt in demselben eine Spannkraft, die grösser als diejenige der atmosphärischen Luft ist; in Folge dieses höheren Druckes strömt sie durch die Düse D in einen benachbarten Feuerraum oder auch in den Schacht eines Bergwerks, das gelüftet werden soll. Was das

Wasser anbelangt, welches sich in dem Kasten B ansammelt, so kann dasselbe fortwährend durch eine Oeffnung, die man in der Nähe der Platte C angebracht sieht, ausfliessen.

Der Gasstrahl, welcher durch ein Wassertrommelgebläse hervorgebracht wird, ist sehr regelmässig. Aber aus dem Gesichtspunkt der Ersparung von Arbeit sind diese Maschinen sehr unvortheilhaft: die Menge der Bewegungsarbeit, welche streng genommen zur Hervorbringung des Luftstrahles aus der Düse erforderlich wäre, ist nur 0,15 der Bewegungsarbeit, welche der verbrauchten Wassermenge entspricht.

Wenn in Folge einer Explosion in einem Bergwerke schnell eine Lufterneuerung in demselben hervorgebracht werden soll, so nimmt man manchmal zu einem Mittel seine Zuflucht, welches auf

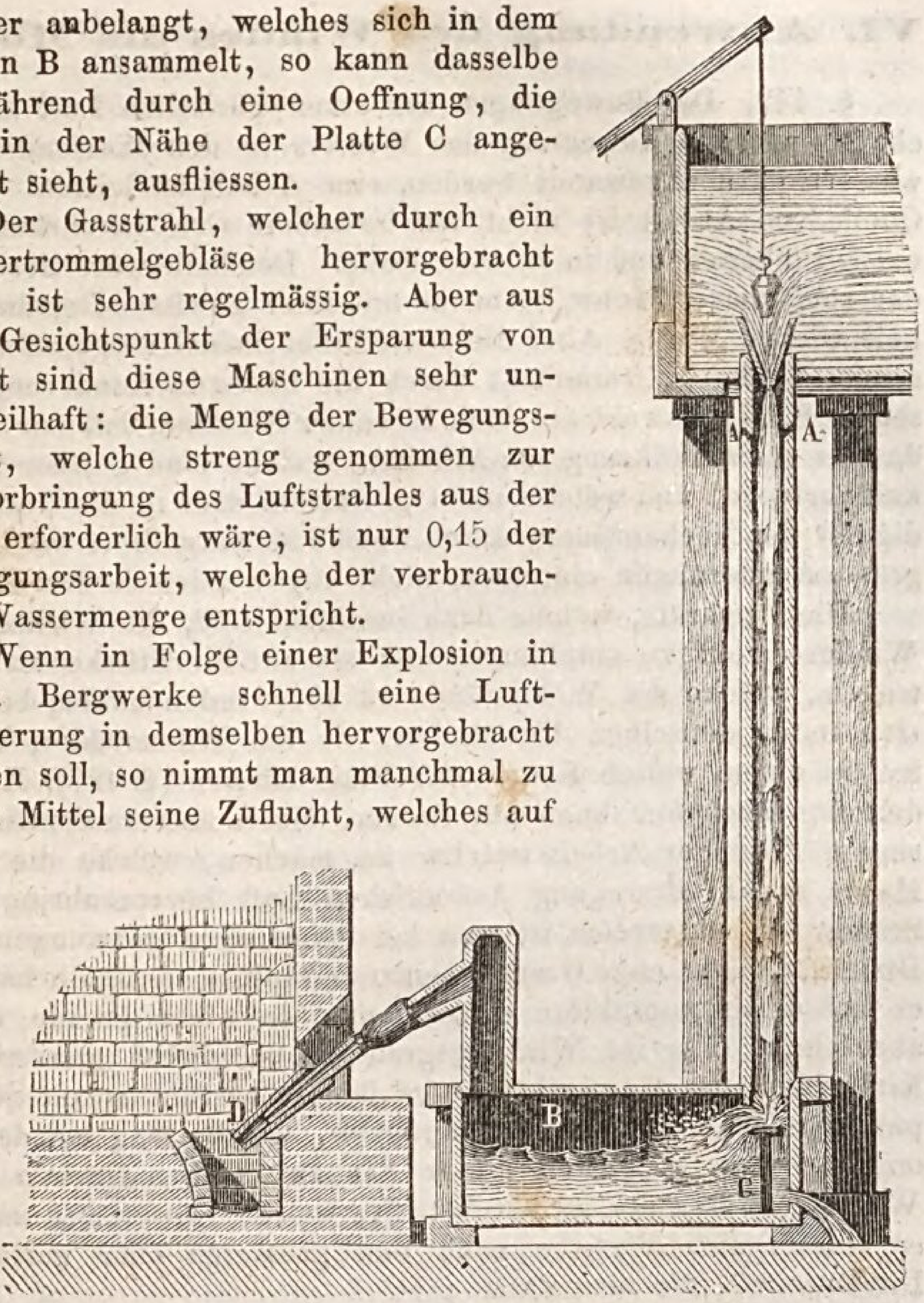


Fig. 582.

demselben Principe wie das Wassertrommelgebläse beruht. Dieses Mittel besteht darin, das Wasser eines benachbarten Baches an die Mündung des Schachtes zu leiten und in denselben hinabströmen zu lassen; dieses Wasser reisst eine bedeutende Quantität Luft mit sich fort, welche es möglich macht, in die Grube hinabsteigen und den verschütteten Arbeitern Hilfe bringen zu können.

VI. Anwendung des Windes als Motor.

§. 449. Die Bewegungen der atmosphärischen Luft können ebenso wie die Bewegung des Wassers in den fliessenden Gewässern dazu angewandt werden, eine Arbeit zu leisten. Diese Quelle von Arbeit ist nicht auf besondere Orte beschränkt, sie existirt überall und in reicher Fülle. Desshalb wäre der Wind der schätzbarste Motor, wenn er mit einer gewissen Regelmässigkeit wirken würde. Aber die ausserordentliche Unregelmässigkeit seiner Wirkung, veranlasst durch die häufigen Aenderungen in seiner Stärke sowohl als auch in seiner Richtung hat zur Folge, dass er zur Ausführung von Arbeiten, welche eine gewisse Stetigkeit verlangen und welche nicht gestatten, dass in der Geschwindigkeit der Mechanismen, durch welche sie ausgeführt werden, zu grosse Aenderungen eintreten, nicht angewendet werden kann.

Die Apparate, welche dazu bestimmt sind, die Wirkung des Windes direkt zu empfangen und sie auf die Stücke zu übertragen, welche die Widerstände zu überwinden haben, befinden sich unter denselben Umständen wie die Wasserräder, welche frei in einem weiten Kanal oder Fluss hängen (§. 427). Es handelt sich auch bei ihnen nur darum, einen ausserordentlich geringen Theil der Arbeit nutzbar zu machen, welche die ganze Masse der in Bewegung befindlichen Luft hervorzubringen im Stande ist; ausserdem ist man bei ihnen nicht gezwungen, ihre Dimensionen in enge Grenzen einzuschränken; desshalb hat man es bei der Construktion dieser Apparate nicht gerade darauf abzusehen, dass ihr Wirkungsgrad ein möglichst grosser wird. Einfachheit der Construktion und leichte Ausführbarkeit der Reparaturen sind die Hauptbedingungen, welche man bei der Anordnung von Apparaten dieser Art zu erfüllen suchen muss. Was die Grösse der Arbeit betrifft, welche sie nutzbar machen, so richtet sich dieselbe nach den grösseren oder geringeren Dimensionen, die man ihnen gibt.

§. 450. **Segelschiffe.** — Der Wind ist derjenige Motor, welcher bei der Schifffahrt auf dem Meere am häufigsten angewandt wird; er war lange Zeit hindurch sogar der einzige, und erst im gegenwärtigen Jahrhundert wurde er bei einer Anzahl von Schiffen durch die Kraft des Dampfes ersetzt. Die geringe Regelmässigkeit des Windes macht sich nothwendig bei der Fahrt der Schiffe, welche ihre Bewegung von ihm erhalten, fühlbar. Bald werden sie durch Windstille längere oder kürzere Zeit hindurch in beinahe vollkommener Unbeweglichkeit gehalten, bald

dagegen werden sie durch die Heftigkeit des Windes den grössten Gefahren ausgesetzt. Und andererseits, wenn auch die Geschwindigkeit des Windes die Grenzen, innerhalb welchen sie für eine gute Fahrt am günstigsten wirkt, nicht überschreitet, so ist doch die Richtung desselben sehr veränderlich und oft sehr von der verschieden, nach welcher das Schiff fortbewegt werden soll.

Damit ein Schiff die Wirkung des Windes, welche zu seiner Fortbewegung erforderlich ist, aufnehmen kann, muss es mit einer Ausrüstung von Masten und Tauwerk versehen werden, die dazu bestimmt sind, die Segel zu tragen, auf welche der Wind seinen Druck ausüben soll. Diese Segel sind grosse Stücke Leinwand, welche ausgespannt und zusammengelegt werden können, und welchen man, je nach Bedürfniss, verschiedene Richtungen geben kann. Wenn sich das Schiff genau in der Richtung des Windes und in demselben Sinn wie dieser bewegen soll, so ist klar, dass man die Segel nur so anordnen darf, dass ihre Flächen senkrecht zur Achse des Schiffes stehen: dann übt der Wind, indem er gerade senkrecht auf sie trifft, einen Druck gegen sie aus, der im Sinne dieser Achse wirkt und eine Bewegung des Schiffes in demselben Sinne hervorbringt. Aber wenn die Richtung des Windes nicht diejenige des Weges ist, welchen das Schiff nehmen soll, so ist man genöthigt, den Segeln eine schiefe Lage im Verhältniss zur Längenachse des Schiffes zu geben und es ausserdem so einzurichten, dass der Wind schief auf ihre Fläche trifft. Indem dann der Wind über die Segel hinstreift, übt er einen Druck gegen sie aus, der immer senkrecht gegen ihre Fläche gerichtet ist und welcher folglich auch eine schiefe Richtung zu derjenigen der Bewegung der Luft hat; wenn andererseits die Bewegung des Schiffes nicht genau im Sinn seiner Länge stattfindet und überdies das Steuerruder mehr oder weniger in passendem Sinne gedreht ist, so folgt daraus ein Widerstand der Flüssigkeit, der schief zur Richtung der Bewegung des Schiffes gerichtet ist. Wenn man nun beachtet, dass die Resultante der Drückungen, welche die Luft auf das Schiff ausübt, und welche grösstentheils von den Segeln empfangen werden, fortwährend dieselbe Richtung wie der von der Flüssigkeit ausgeübte Widerstand haben muss, so wird man sehen dass die beiden Ursachen, welche soeben bezeichnet worden sind, zusammentreffen, um eine grössere oder geringere Schiefe der Richtung der Bewegung des Schiffes gegen diejenige des Windes, welcher sie veranlasst, hervorzubringen.

Indem man den Segeln sowohl, als dem Steuerruder die passenden Stellungen gibt, kann man es so einrichten, dass diese

Schiefe sehr gross wird; ja man kann es sogar dahin bringen, dass sich das Schiff in einer Richtung, entgegengesetzt von der des Windes, fortbewegt. Wenn die Richtung der Bewegung des Schiffes den möglichst kleinsten Winkel mit der Richtung bildet, von welcher der Wind kommt, so sagt man, man fahre so nahe als möglich bei dem Wind; der Winkel, der durch diese beiden Richtungen gebildet wird, kann bis auf 65°, ja unter den günstigsten Umständen sogar auf 60° reducirt werden. Indem man so, bald auf der einen, bald auf der anderen Seite, möglichst nahe bei dem Winde fährt, und auf diese Weise eine Zickzacklinie beschreibt, kann man es offenbar dahin bringen, dass sich zuletzt das Schiff in gerade entgegengesetzter Richtung von der des Windes fortbewegt hat; man nennt diese Fahrweise laviren.

§. 451. **Windmühlen.** — Die Kraft des Windes wird schon seit unvordenklichen Zeiten angewandt, um Mühlen zum Mahlen des Getreides in Bewegung zu setzen, welchen man den Namen Windmühlen gibt. Die Fig. 583 zeigt die Einrichtung dieser Maschinen. Eine Welle AB, die sich in Lagern, von welchen sie getragen wird, um ihre Achse drehen kann, ist in der Richtung des Windes aufgestellt. Sie bildet einen Winkel von 10 bis 15 Grad mit dem Horizont. Diese Neigung wurde angenommen, weil man bemerkt hat, dass die Bewegung der Luft gewöhnlich nicht horizontal gerichtet ist, sondern einen kleinen Winkel mit der Oberfläche der Erde bildet. Am Ende A der Welle AB sind, senkrecht auf ihre Länge, vier Arme, Windruthen genannt, so befestigt, dass sie eine Art Kreuz bilden; jede dieser Ruthen dient einer fast rechteckigen, viel längeren als breiten Fläche C, welche dazu bestimmt ist, die Wirkung des Windes aufzunehmen, und die man Windflügel nennt, zur Achse. Man gibt den Flügeln gewöhnlich eine Breite von 2^m und eine Länge von 11^m; das der Welle AB zunächst liegende Ende derselben ist gewöhnlich noch um 2^m von derselben entfernt: der Raum, welchen die vier Flügel zu ihrer Bewegung brauchen, hat folglich einen Durchmesser von 26^m. Jeder Flügel wird von den sog. Windsprossen gebildet, die in gewissen Entfernungen quer durch die Windruthe gesteckt sind, und deren Enden zu beiden Seiten dieser Windruthe, der ganzen Länge der Flügel nach, durch andere Holzstücke, Saumlatten genannt, verbunden werden. Die so gebildeten durchbrochenen Rahmen haben grosse Aehnlichkeit mit einer Leiter, welche in der Mitte ihrer Sprossen an der Windruthe befestigt ist. Ueber die ganze Fläche dieses Rahmens kommt eine Bedeckung von Segeltuch zu liegen, sodass eine

zusammenhängende Fläche gebildet wird, die dazu bestimmt ist, die Luft in ihrer Bewegung aufzuhalten und folglich den daraus hervorgehenden Druck aufzunehmen.

Die Flächen der Flügel sind nicht in der Ebene gelegen, die senkrecht zur Welle AB steht und ihre Achsen enthält; sie besitzen vielmehr eine gewisse Neigung zu dieser Ebene, sodass sie die Wirkung des Windes, deren Richtung

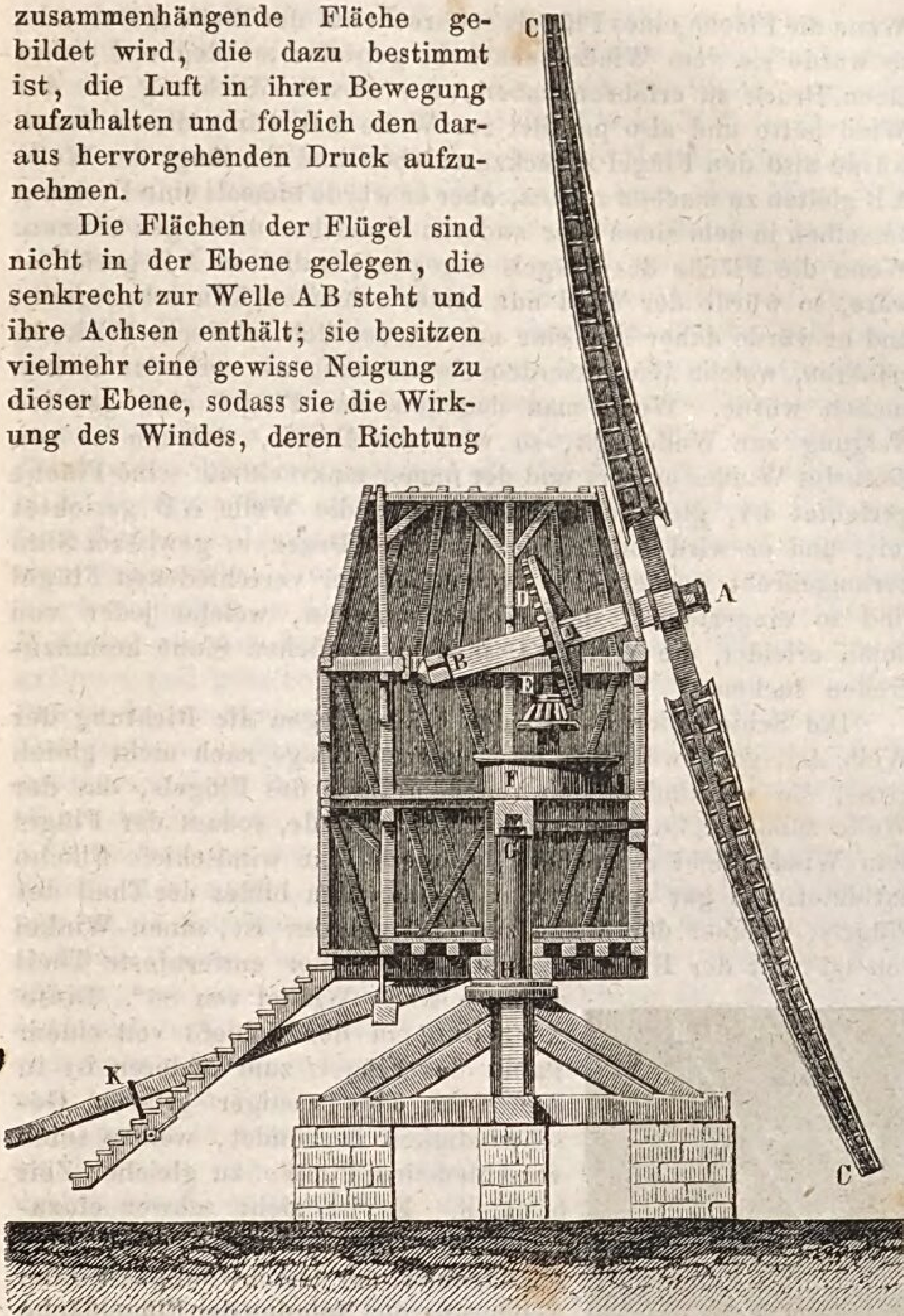


Fig. 583.

dieselbe wie diejenige der Welle AB ist, in schiefer Richtung empfangen. Es ist leicht, sich von der Nothwendigkeit dieser Schiefe der Flügel gegen die Richtung der Welle AB Rechenschaft zu geben.

Wenn die Fläche eines Flügels senkrecht auf der Welle AB stünde, so würde sie vom Winde senkrecht getroffen werden und daher einen Druck zu erfahren haben, der dieselbe Richtung wie der Wind hätte und also parallel zur Welle AB wäre; dieser Druck würde also den Flügel zurückzuschieben und ihn längs der Welle AB gleiten zu machen suchen, aber er würde niemals eine Drehung desselben in dem einen oder anderen Sinne hervorbringen können. Wenn die Fläche des Flügels dagegen parallel zu AB gerichtet wäre, so würde der Wind nur seiner schmalen Kante begegnen, und er würde daher nur eine ausserordentlich schwache Wirkung erfahren, welche ihn ausserdem ebensowenig wie vorhin zu drehen suchen würde. Wenn man dagegen dem Flügel eine gewisse Neigung zur Welle gibt, so wird der Druck, welchen er von Seite des Windes erfährt und der immer senkrecht auf seine Fläche gerichtet ist, gleichfalls schief gegen die Welle AB gerichtet sein, und er wird folglich durch diesen Druck in gewissem Sinn herumgedreht werden. Die Neigungen der verschiedenen Flügel sind so eingerichtet, dass die Drückungen, welche jeder von ihnen erleidet, die Welle AB in dem nämlichen Sinne herumzudrehen suchen.

Die Schiefe der Fläche der Flügel gegen die Richtung der Welle AB ist gewöhnlich ihrer ganzen Länge nach nicht gleich gross; sie vermindert sich von dem Ende des Flügels, das der Welle zunächst liegt, bis zum anderen Ende, sodass der Flügel dem Winde nicht eine ebene, sondern eine windschiefe Fläche darbietet. Bei gut construirten Windmühlen bildet der Theil des Flügels, welcher der Welle zunächst gelegen ist, einen Winkel von 60° mit der Richtung dieser Welle, der entfernteste Theil dagegen einen Winkel von 80°. Diese Aenderung in der Schiefe von einem Punkt des Flügels zum anderen ist in der mehr oder weniger grossen Geschwindigkeit begründet, welche seine verschiedenen Punkte zu gleicher Zeit besitzen. Es ist nicht schwer einzusehen, dass in der That diese Verschiedenheit der Geschwindigkeit eine Aenderung der Neigung der Flügelfläche bedingt. Es sei MN (Fig. 584) der Theil der Fläche des Flügels, welchen wir betrachten. Nehmen wir an, dass sich der Wind im Sinn des Pfeiles f bewege,

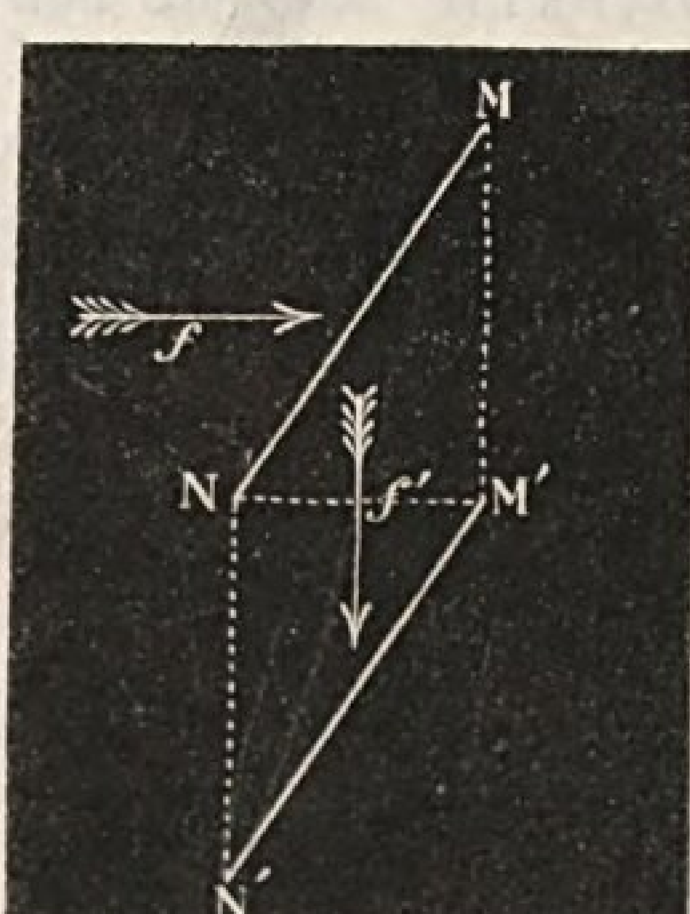


Fig. 584.

dass dagegen die Fläche M N, indem sie sich um die nach dem nämlichen Pfeil f gerichteten Welle der Mühle dreht, nach einer auf der f senkrechten Richtung, die durch den Pfeil f' angezeigt ist, fortschreitet. Wenn, während die Fläche M N in die Lage M′ N′ übergeht, ein nächst N gelegenes Molekül der Luft in Folge seiner eigenen Geschwindigkeit genau den Weg N M′ durchlaufen kann, so ist klar, dass dieses Molekül durch die Oberfläche M N in seiner Bewegung nicht aufgehalten, dass es folglich nicht längs dieser Fläche gleiten und daher auf dieselbe keinerlei Wirkung ausüben wird. Damit die Fläche M N einen Druck von Seite des Windes erfahren kann, muss die Geschwindigkeit der Luftmoleküle so gross sein, dass dieselben, wenn sie nicht aufgehalten würden, einen grösseren Weg als den N M′ durchlaufen könnten, während die Fläche M N in die Stellung M′ N′ übergeht. Man sieht in der That, dass in diesem Fall jene Oberfläche die Bewegung der Luft aufhält und dass sie folglich eine Gegenwirkung von Seiten der Luft erfährt, welche ihre Geschwindigkeit zu beschleunigen sucht. Wenn wir der Fläche M N, bei ein und derselben Geschwindigkeit des Windes, immer grössere und grössere Geschwindigkeiten beilegen, so wird diese Fläche immer kürzere Zeiten erfordern, um in die Stellung M′ N′ überzugehen; während dieser Zeiten werden folglich die Luftmoleküle in Folge ihrer eigenen Geschwindigkeiten immer kleinere Wege durchlaufen. Damit also diese Wege immer grösser als N M′ bleiben und folglich der Wind immer einen Druck auf die Fläche M N ausübt, so muss N M′ immer kleiner und kleiner werden, in dem Maasse, als sich M N schneller bewegt; oder mit anderen Worten, es muss sich M N mehr und mehr der Lage nähern, wo sie senkrecht auf der Richtung des Windes oder auch auf der Richtung der Welle der Mühle steht. Nun befinden sich die verschiedenen Theile eines Flügels, die in immer grösseren und grösseren Entfernungen von der Umdrehungswelle gelegen sind, genau in dem Fall, welchen wir oben vorausgesetzt haben; sie bewegen sich um so schneller, je weiter sie von der Umdrehungswelle entfernt sind, und empfangen doch die Wirkung einer Luftmasse, welche überall die nämliche Geschwindigkeit besitzt; daraus folgt also, dass sich die Schiefe dieser verschiedenen Theile gegen die Richtung der Welle in Folge der Vermehrung ihrer Geschwindigkeit vermindern muss.

Aus dem Vorhergehenden folgt zugleich, dass bei einer bestimmten Geschwindigkeit der Flügel die Wirkung des Windes auf dieselben um so grösser wird, je mehr sich ihre Flächen der

Lage nähern, wo sie senkrecht auf der Umdrehungswelle stehen; zugleich aber ist klar, dass sich die Kraft, mit welcher dieselben in der Richtung f' bewegt werden, mit der Annäherung an diese Lage mehr und mehr verkleinert; es muss also bei gegebener Geschwindigkeit der Flügel und des Windes einen gewissen vortheilhaftesten Winkel (Stosswinkel) geben, den die Fläche derselben mit der Richtung des Windes oder mit der Umdrehungswelle bildet, und bei welchem die Wirkung des Windes auf den Flügel die grösstmöglichste ist. Die oben angegebenen Winkel (60—80°) gelten für die Umdrehungsgeschwindigkeit, wie sie gewöhnlich bei Windmühlen stattfindet, wo ungefähr 16 Umdrehungen in der Minute gemacht werden.

Die Rotationsbewegung, welche der Wind der Welle AB (Fig. 583) ertheilt, wird auf den inneren Mechanismus der Mühle mittelst eines Zahnrades D, das an dieser Welle befestigt ist, und einer Laterne E, in welche das Rad D eingreift, übertragen; die Laterne E ist auf derselben Achse wie der Läufer F befestigt (§. 187). Die ganze Maschine wird durch ein starkes, vertikales Stück Holz GH getragen, um welches sie sich wie um eine Achse drehen kann. Ein langer Hebel K ist an der Mühle befestigt und dient dazu, sie zu richten; indem man auf das Ende dieses Hebels wirkt, kann man die ganze Mühle um GH drehen und auf diese Weise die Welle AB in die Richtung bringen, von welcher der Wind kommt. Um diese Operation zu erleichtern, bringt man häufig am Ende des Hebels K einen kleinen Haspel an (§. 81), um welchen sich ein Seil wickelt, dessen freies Ende in gewisser Entfernung an dem Boden befestigt wird. Indem man den Haspel dreht, sucht man das Seil auf seinem Umfang aufzuwickeln; aber da sein Ende befestigt ist, und daher der Zugkraft, welche an dem Seile angebracht ist, nicht Folge leisten kann, so muss sich der Haspel fortbewegen und diese seine Bewegung auf den Hebel K und die Mühle übertragen.

Der Bewegungsapparat einer Windmühle, bestehend aus der Welle AB und den Flügeln C, C, wird häufig auch angewendet, um andere Mechanismen, wie z. B. Sägen (§. 189) oder Holländische Wasserschrauben (§. 398) u. s. w. in Bewegung zu setzen. Man hat dabei den Namen Windmühle, im weiteren Sinn genommen, für jenen Apparat beibehalten, welches auch die Art der Arbeit ist, für welche er verwendet wird.

§. 452. Wenn sich eine Windmühle nicht mehr bewegen soll, so legt man die Segeltuchbedeckung der Flügel zusammen, indem man sie der durch die Ruthe gebildeten Achse jedes Flügels

nähert. Die auf diese Weise durchbrochen gewordenen Flächen der Flügel sind nicht mehr im Stande, die Wirkung des Windes aufzunehmen. Um die Maschine, nachdem ihre Treibwelle in die Richtung des Windes gestellt ist, wieder in Bewegung zu setzen, reicht es hin, die Bedeckung der Flügel wieder auszubreiten. Um diese Operationen ausführen zu können, führt man nach und nach jeden der Flügel an den tiefsten Punkt des Weges, welchen er, indem er sich dreht, durchläuft, und hält ihn in dieser Stellung fest, während man auf den Windsprossen wie auf einer Leiter emporsteigt, sei es nun, um die Bedeckung zusammenzulegen, oder um sie auszubreiten. Um aber die Flügel in einer bestimmten Lage unbeweglich festzuhalten, bedient man sich einer Bremse, ähnlich der in Fig. 280 (S. 374) abgebildeten. Diese Bremse wird aus einem grossen Ring von Holz gebildet, welcher das Rad D (Fig. 583) umgibt und dessen eines Ende festgemacht ist; das andere Ende ist an einem starken Hebel befestigt, dessen Gewicht allein hinreicht, den Ring so stark gegen den Umfang des Rades D anzudrücken, dass er sich jeder Bewegung desselben widersetzt. Während des Ganges der Maschine ist dieser Hebel gehoben und wird durch einen Haken getragen, der ihn verhindert, auf die Bremse zu wirken.

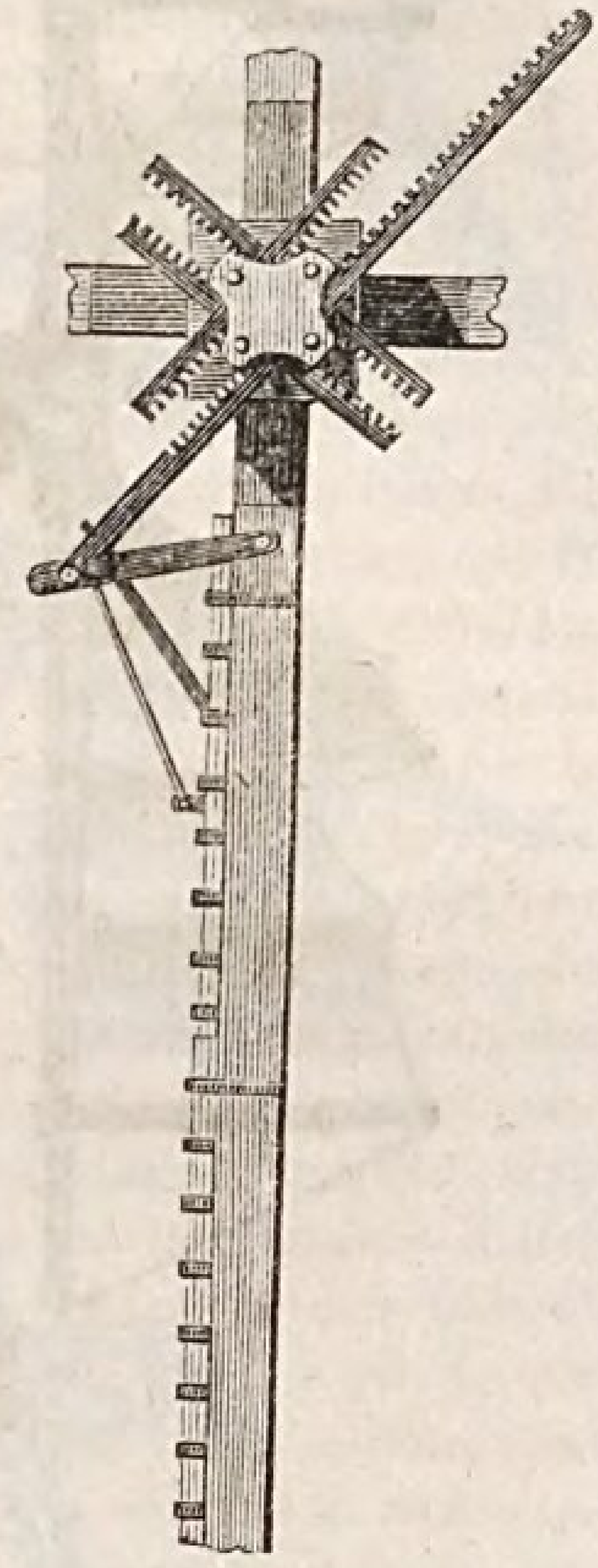
Man sieht, dass das Geschäft, die Segeltuchbedeckung der Flügel einer Mühle auszubreiten oder zusammenzulegen, nicht sehr bequem ist; es erfordert eine gewisse Zeit und ausserdem setzt es denjenigen, welcher es auszuführen hat, ziemlich grossen Gefahren aus, besonders wenn es sich darum handelt, bei sehr heftig werdendem Winde die Mühle schnell der Wirkung desselben zu entziehen. Andererseits ist es nicht möglich, die Flügelbedeckung in jedem Augenblick, je nachdem der Wind mehr oder weniger stark ist, mehr oder weniger zusammenzulegen; und doch wäre es gut, dies thun zu können, um die Maschine nicht unnütz anzustrengen und zu verhindern, dass ihre Bewegung zu rasch wird. Um diese verschiedenen Nachtheile zu beseitigen, hat in neuester Zeit *Berton* ein besonderes System von Windflügeln erdacht, das immer häufiger angewandt wird und welches gestattet, während des Ganges der Mühle nach Belieben die Grösse der Flügelfläche, welche die Wirkung des Windes aufnimmt, ändern zu können. Die Figur 585 zeigt die Einrichtung dieser Flügel. Die Triebwelle der Mühle ist wie bei den gewöhnlichen Mühlen mit vier Armen A versehen, welche senkrecht auf ihr stehen und welche die Achsen der Flügel bilden sollen. Aber anstatt dass diese Flügel eine durchbrochene

Oberfläche haben, welche man beliebig mit Segeltuch bedeckt, werden sie hier aus einer gewissen Anzahl von Latten C gebildet, welche sich theilweise bedecken und auf diese Weise eine auf die Richtung der Welle der Mühle schiefe Fläche bilden. Diese Latten, welche grosse Aehnlichkeit mit denen haben, aus welchen die Jalousien bestehen, sind mittelst Klammern D an Querstäben E befestigt. Die Querstangen E selbst sind an verschiedenen Punkten an dem Arme A angebracht, aber auf diese Art, dass sie sich um ihre Befestigungspunkte drehen und einen mehr oder weniger spitzen Winkel mit der Richtung der Arme bilden können. Die Klammern D sind gleichfalls um ihre Befestigungspunkte mit den Querstangen E beweglich. Vier Zahnstangen N sind an einem ihrer Enden mit der ersten Querstange jedes Flügels scharnierartig verbunden; sie greifen ausserdem in ein gezahntes Trieb, das am Ende der Mühlwelle gelegen ist. Dieses Trieb ist an einer Achse von Eisen befestigt, welche die Treibwelle, die zu diesem Ende hohl ist, ihrer ganzen Länge nach durchdringt und sich am anderen Ende dieser Welle in eine Kurbel endigt, mittelst welcher man sie innerhalb der Treibwelle leicht drehen kann. Indem man auf die Kurbel wirkt, gibt man der Achse, welche sie trägt, und dem am anderen Ende dieser Achse



Fig. 585.

befestigten Trieb eine Rotationsbewegung in dem einen oder anderen Sinn. Dadurch werden die Zahnstangen N eine gewisse Strecke fortgezogen oder geschoben; in Folge dessen wird die Neigung der Querstangen E gegen die Arme A verändert, woraus folgt, dass sich die Latten C mehr oder weniger bedecken, oder mit anderen Worten, dass die Flügel dem Winde eine Fläche von grösserer oder geringerer Breite darbieten. Indem man die Kurbel in passendem Sinne und um eine hinreichende Grösse dreht, gelangt man sogar dazu, dass sich die Latten C vollständig überdecken, sodass sich die Flügel so zeigen als wenn sie blos auf ihre Arme reducirt wären (Fig. 586).


Fig. 586.

Man sieht, dass das Ausbreiten und Zusammenlegen der *Berton*'schen Flügel mit der grössten Leichtigkeit im Innern der Mühle und selbst während des Gangs der Maschine ausgeführt werden kann. Man kann also ohne Mühe und so oft als man will die Breite der Flügel in Verhältniss zur Geschwindigkeit des Windes setzen, welcher auf sie wirkt. Indessen zeigt auch dieses System einen Fehler, welcher darin besteht, dass die Fläche jedes Flügels seiner ganzen Länge nach eine gleiche Neigung zur Richtung des Windes hat. Nach dem, was wir oben gesagt haben, werden also die äussersten Theile der Flügel nur einen geringen Theil der Wirkung des Windes aufnehmen, wenn sie überhaupt eine solche empfangen. Bei gleicher Oberfläche entwickeln also die *Berton*'schen Flügel weniger Arbeit als diejenigen, deren Fläche in ihren verschiedenen Punkten eine verschiedene Neigung gegen die Treibwelle hat.

Man hat gefunden, dass der Gang einer Windmühle, bei welchem sie die grösste Menge von Arbeit entwickelt, derjenige ist, für welchen die Anzahl der Umdrehungen der Flügel in der Minute gleich der doppelten Zahl von Metern ist, welche der Wind in einer Secunde durchläuft.

§. 453. Seit einer gewissen Reihe von Jahren hat sich *Amédée Durand* viel mit der Aufgabe beschäftigt, die Kraft des Windes zur Bewegung von Pumpen, die zum Heben von Wasser bestimmt sind, nutzbar zu machen. Die Figuren 587 und 588 zeigen den Apparat, bei welchem er zuletzt stehen geblieben ist und welcher ausgezeichnete Resultate ergeben hat.

Das Rad, welches direkt die Wirkung des Windes empfängt, wird aus sechs Flügeln gebildet; dieses Rad ist

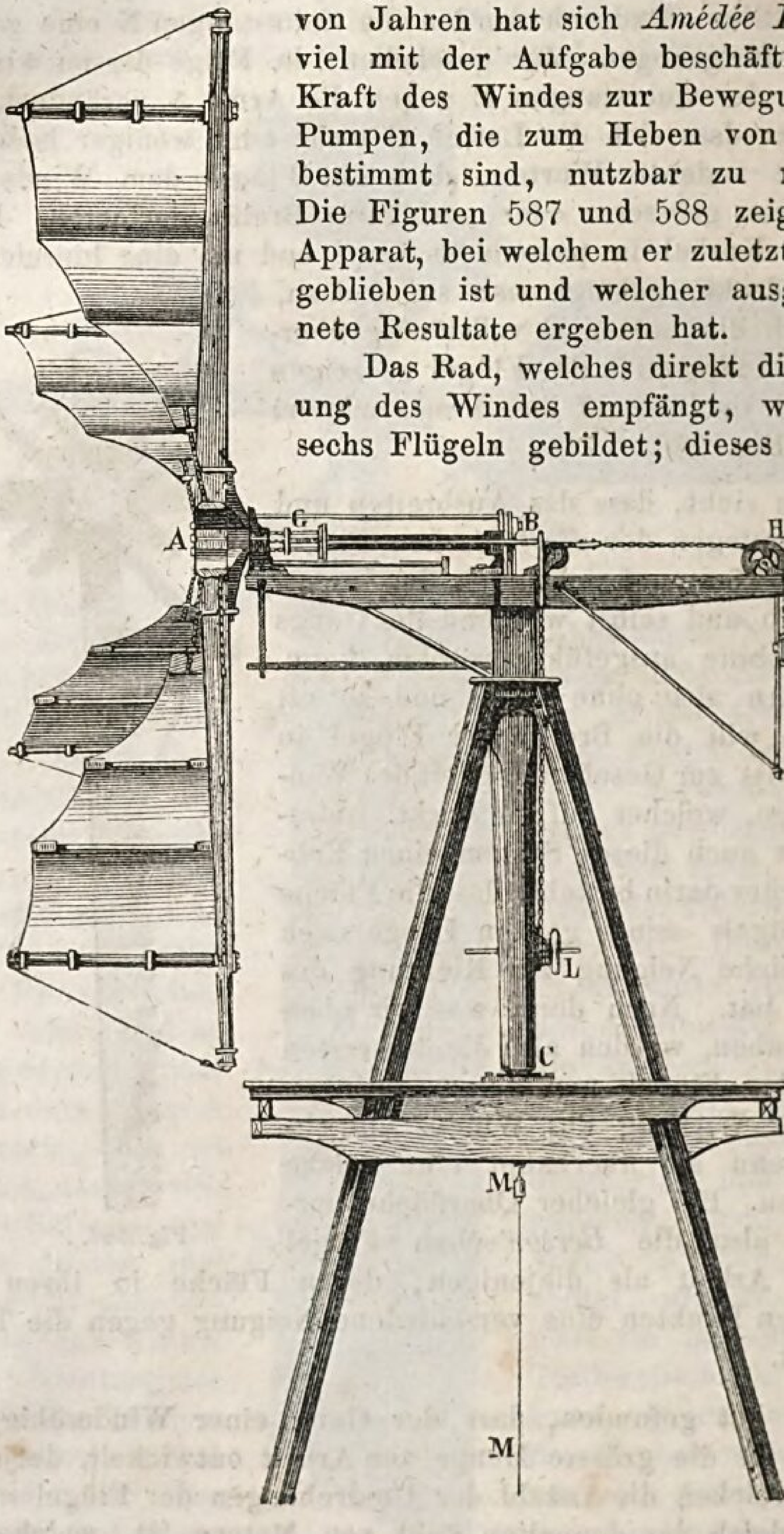


Fig. 587. (Maassstab 11 : 1000.)

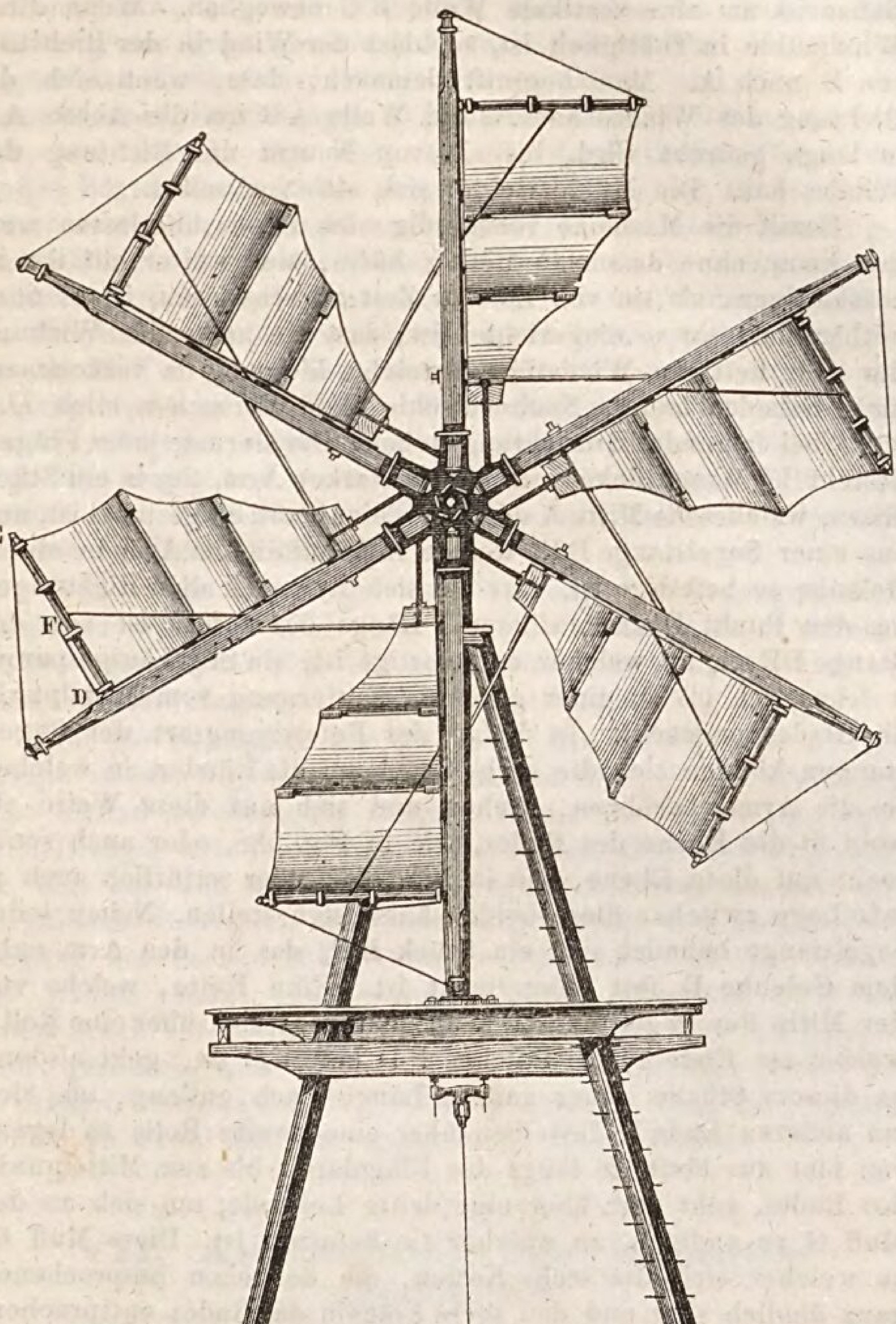


Fig. 588.

an dem Ende einer horizontalen Welle AB befestigt und das Ganze ist um eine vertikale Welle B C beweglich. Wenn diese Windmühle in Thätigkeit ist, so bläst der Wind in der Richtung von B nach A. Man begreift demnach, dass, wenn sich die Richtung des Windes ändert, die Welle AB um die Achse AC so lange gedreht wird, bis sie von Neuem die Richtung des Windes hat. Die Mühle richtet sich also von selbst.

Damit die Maschine vollständig sich selber überlassen werden kann, ohne dass man nöthig hätte, sich weiter mit ihr zu beschäftigen, als sie von Zeit zu Zeit zu schmieren, ist es noch nöthig, dass sie so eingerichtet ist, dass sie unter der Wirkung der sehr heftigen Windstösse, welche hie und da vorkommen, nicht Schaden leidet. Nach verschiedenen Versuchen blieb *Durand* bei folgender Einrichtung stehen: Das Gerüste jedes Flügels besteht im Wesentlichen aus einem starken Arm, der in ein Stück Eisen, welches die Mitte A des Rades einnimmt, eingesteckt ist, und aus einer Segelstange DE, welche in D auf diesem Arm in einem Gelenke so befestigt ist, dass sie sich frei nach allen Richtungen um den Punkt D drehen kann. Längs des Armes ist von der Stange DE an, an welcher es befestigt ist, ein Segel ausgespannt, welches sich bis zu einer geringen Entfernung vom Mittelpunkt des Rades erstreckt. In Folge der Befestigungsart der Segelstangen können sich die sechs Segel um die Ränder, in welchen sie die Arme berühren, drehen und sich auf diese Weise sowohl in die Ebene des Rades, wie in Fig. 588, oder auch senkrecht auf diese Ebene, wie in Fig. 587, oder natürlich auch in jede Lage zwischen diese beiden äussersten stellen. Neben jeder Segelstange befindet sich ein Stück DF, das in den Arm nahe dem Gelenke D fest eingesteckt ist. Eine Kette, welche von der Mitte der Segelstange DE ausgeht, legt sich über eine Rolle, welche am Ende F des Stückes FD befestigt ist, geht alsdann an diesem Stücke seiner ganzen Länge nach entlang, um sich am anderen Ende D desselben über eine zweite Rolle zu legen; von hier aus läuft sie längs des Flügelarms bis zum Mittelpunkt des Rades, geht dort über eine dritte Leitrolle, um sich an der Muff G zu endigen, an welcher sie befestigt ist. Diese Muff G, an welcher sich die sechs Ketten, die der eben besprochenen ganz ähnlich sind und den sechs Flügeln des Rades entsprechen, endigen, kann zu gleicher Zeit längs der Welle AB gleiten und sich um dieselbe drehen. Eine andere Kette, die an dieser Muff G befestigt ist, geht über die Leitrolle H und trägt ein Gegengewicht K; die Verbindung der Muff G mit dieser letzteren

Kette ist derart eingerichtet, dass sich die Muff um die Welle AB drehen kann, ohne die Kette um sich selber zu drehen. Die Wirkung des Gegengewichtes K sucht fortwährend die Muff G gegen das Ende B der Welle AB zu ziehen und folglich die verschiedenen Segelstangen DE an die Stücke DF anzulegen, wie man dies in Fig. 588, wo alle Segel in der Ebene des Rades liegen, sieht. Aber wenn der Wind in der Richtung BA bläst, so werden die Segel zurückgedrückt und nehmen eine gewisse Schiefe gegen die Ebene des Rades an; die Segel nehmen dabei natürlich die Segelstangen mit fort und indem dieselben an den Ketten ziehen, welche an ihnen befestigt sind, bewegen sie die Muff G gegen den Punkt A hin und heben folglich das Gegengewicht in die Höhe. Je stärker der Wind weht, desto weiter entfernen sich die Segel von der Ruhelage, welche Fig. 588 zeigt; und wenn sie einem sehr heftigen Wind ausgesetzt sind, so wenden sie sich völlig seitwärts und stellen sich so, wie es Fig. 587 angibt.

Wenn man die Flügel der Wirkung des Gegengewichtes entziehen will, so hebt man dasselbe mittelst einer anderen Kette, welche über eine bei B gelegene Rolle geht und sich um einen kleinen Haspel L wickelt, etwas empor.

Um die Bewegung der Mühle auf den Kolben einer Wasserpumpe zu übertragen, reicht es hin, am Ende B der Welle AB eine Kurbel anzubringen, welche, indem sie sich dreht, einer Bleuelstange, mit welcher sie mittelst eines Gelenkes verbunden ist, eine auf- und absteigende Bewegung ertheilt; die hin- und hergehende Bewegung der Bleuelstange bringt eine ähnliche Bewegung der Stange MM hervor, welche unten an dem Kolben der Pumpe endigt. Die Stange MM ist ausserdem oben mit einem Stück versehen, welches den Theilen, die über ihm gelegen sind, gestattet, sich mit der Mühle um die vertikale Achse BC zu drehen, während der übrige Theil der Stange, sowie der Pumpenkolben an dieser Drehbewegung nicht Theil nehmen.

VII. Anwendung des Dampfes als Motor.

§. 454. Die Anwendung des Wasserdampfes als Motor bei den Dampfmaschinen ist, obwohl verhältnissmässig noch neu, doch schon ausserordentlich verbreitet und gewinnt immer noch mehr an Ausdehnung. Der Wasserdampf ist ohne Zweifel unter

allen bekannten Motoren für die Industrie der werthvollste; er kann überall, an jedem Ort und von beliebiger Stärke, von der Kraft eines Menschen an bis zu der von mehreren Hunderten von Pferden, beschafft werden. Bevor wir jedoch zu der Beschreibung der Apparate und Einrichtungen übergehen, mittelst welcher man die Kraft des Wasserdampfes nutzbar machen konnte, ist es unerlässlich, zuerst einige der wichtigsten Eigenschaften dieses Dampfes zu besprechen, da auf diesen Eigenschaften alles das, was wir später über die Dampfmaschine sagen werden, beruht.

§. 455. **Eigenschaften des Wasserdampfes.** — Wenn in einem geschlossenen Gefäss eine gewisse Menge Wasser enthalten ist, ohne jedoch dieses Gefäss vollständig auszufüllen, so verwandelt sich immer ein Theil des Wassers in Dampf, welches auch die Temperatur dieses Wassers sein mag. Der so gebildete Dampf verbreitet sich in dem Theil des Gefässes, der nicht vom Wasser eingenommen wird, gleichviel, ob dieser Theil anfangs luftleer, oder ob schon ein anderes Gas, wie z. B. die atmosphärische Luft, darin enthalten war. In dem Maasse als der Dampf sich bildet und sich in dem Raum über dem Wasser ansammelt, wächst seine Spannkraft; aber diese Spannkraft kann eine gewisse Grenze, welche einzig von der Temperatur des Wassers abhängt, nicht überschreiten. Von da an, wo der Dampf diese Grenze, welche man das Maximum seiner Spannkraft nennt, erreicht hat, wird kein neuer Dampf mehr entwickelt; man sagt alsdann, der Raum, in welchem er sich befindet, sei mit Wasserdampf gesättigt, oder auch wohl, der Dampf selbst sei gesättigt. Die Gegenwart von Luft in dem Raum, wo sich der Dampf verbreitet, hat keinen Einfluss auf das Maximum der Spannkraft, von dem wir eben gesprochen haben; diese Luft bestimmt lediglich den Grad der Schnelligkeit, mit welcher sich der Dampf bildet. Wenn der Raum über dem Wasser luftleer, überhaupt leer von jeglicher Materie ist, so verdampft die Flüssigkeit mit ausserordentlicher Schnelligkeit und der Dampf gewinnt fast augenblicklich seine Maximalspannung; wenn dagegen jener Raum Luft enthält, so bildet sich der Dampf nur allmählich und verbreitet sich ebenso in dem ihm gebotenen Raum, indem er gleichsam zwischen den Molekülen der Luft durchfiltrirt. In diesem letzteren Fall ist die Spannkraft des Gasgemenges, welches sich in Berührung mit dem Wasser befindet, in jedem Augenblick gleich der Summe der Spannkräfte der Luft und des Wasserdampfes, welchen die Luft enthält.

Wenn das Gefäss, welches das Wasser enthält, offen ist und also frei mit der atmosphärischen Luft in Verbindung steht, so verdampft das Wasser gleichfalls; aber indem sich der Wasserdampf fortwährend nach aussen in die freie Luft verbreitet, kann er das Maximum seiner Spannkraft, welches der Temperatur des Wassers entspricht, nicht mehr erreichen; die Verdampfung dauert also immer fort, bis kein Wasser mehr übrig bleibt. — Die Maximalspannung des Dampfes ist um so grösser, je höher die Temperatur des Wassers ist; die Schnelligkeit, mit welcher sich das Wasser, welches direkt mit der freien Luft in Verbindung steht, in Dampf verwandelt, wächst gleichfalls mit der Temperatur. Wenn die Temperatur so hoch ist, dass die Maximalspannung des Wasserdampfes gleich dem Drucke der atmosphärischen Luft wird, so geht die Verdampfung des Wassers am schnellsten vor sich. In diesem Fall hat der Wasserdampf nicht mehr nöthig, sich nach und nach in die Zwischenräume zwischen den Molekülen der Luft einzudrängen; er hat Kraft genug, um den Druck, welchen die Atmosphäre auf die Oberfläche des Wassers ausübt, zu überwinden und die Luft zurückzudrängen, um sich freien Ausgang nach aussen zu verschaffen. Alsdann bilden sich Dampfblasen in der ganzen Masse der Flüssigkeit und erheben sich gewaltsam und mit Geräusch unter heftiger Bewegung des Wassers bis an die Oberfläche desselben, um in die atmosphärische Luft überzugehen: das Wasser s i e d e t oder k o c h t. Im Allgemeinen kommt das Wasser allemal dann in's Kochen, wenn die seiner Temperatur entsprechende Maximalspannung des Dampfes nicht kleiner als der Druck ist, welchen die Flüssigkeit an ihrer Oberfläche von Seiten der über ihr stehenden Atmosphäre zu erleiden hat, sei es nun, dass diese Atmosphäre blos von Luft oder einem anderen Gas, oder auch von Dampf, oder auch von einem Gemenge beider, in irgend einem Verhältniss, gebildet werde.

§. 456. Wenn eine gewisse Menge Wasserdampf in einem geschlossenen Raum, in welchem sich kein Wasser befindet, enthalten und seine Spannung geringer ist als die Maximalspannung, welche seiner Temperatur entspricht, so verhält sich dieser Dampf, der gewöhnlich ü b e r h i t z t genannt wird, genau so wie ein Gas. Wenn man sein Volumen ändert, so ändert sich zu gleicher Zeit seine Spannkraft und zwar entsprechend dem *Mariotte*'schen Gesetz (§. 305), vorausgesetzt, dass diese Spannkraft stets geringer bleibt als die Maximalspannung, dass also der Dampf nicht in gesättigten Zustand übergeht. Wenn man aber das Volumen des

Dampfes so weit vermindert hat, dass seine Spannkraft gleich der seiner Temperatur entsprechenden Maximalspannung geworden ist und man fährt von da ab fort, ihn noch weiter zusammenzudrücken, so vergrössert sich seine Spannkraft nicht mehr: sie bleibt gleich der Maximalspannung und ein Theil des Wasserdampfes condensirt sich, indem er in den flüssigen Zustand zurückkehrt. Wenn man hierauf den Raum, in welchem sich der Dampf verbreiten kann, wieder vergrössert, so kehrt das vorhin condensirte Wasser wieder in den dampfförmigen Zustand zurück und erhält so die Spannkraft des Dampfes in der Höhe der Maximalspannung, so lange noch etwas Flüssigkeit vorhanden ist; aber von dem Augenblicke an, wo sich alles Wasser wieder in Dampf verwandelt hat, bringt eine neue Vergrösserung des Raumes, welcher ihm geboten wird, eine Verminderung der Spannkraft des Dampfes hervor und dieser nimmt so wieder die Eigenschaften der Gase an.

§. 457. Wenn eine Masse von Dampf in einem Raum enthalten ist, dessen verschiedene Stellen nicht die nämliche Temperatur haben, so kann seine Spannkraft nicht grösser werden als die Maximalspannung, welche der niedrigsten Temperatur der verschiedenen Stellen dieses Raumes entspricht. Denn für den Zustand des Gleichgewichts in der Dampfmasse ist erforderlich, dass sie an allen Stellen gleiche Spannkraft besitzt; wenn also das oben Behauptete nicht stattfände, so müsste sich in den Punkten, wo die Temperatur am tiefsten ist, eine gewisse Menge Dampf befinden, dessen Spannkraft die Maximalspannung, welche der Temperatur an diesen Stellen entspricht, überstiege, was nicht möglich ist. Wenn auf irgend eine Weise eine Dampfmasse in Verbindung mit einem Raum gesetzt wird, dessen Temperatur einer Maximalspannung entspricht, die unterhalb der Spannung dieses Dampfes liegt, so wird dadurch rasch die Condensation eines Theils des Dampfes hervorgebracht, so lange bis der übrigbleibende Dampf den eben angegebenen Bedingungen genügt. Diese Condensation findet natürlich in dem Raume statt, wo die Temperatur am niedrigsten ist.

§. 458. Es wurden zahlreiche Versuche angestellt, um das Maximum der Spannkraft des gesättigten Wasserdampfes bei verschiedenen Temperaturen zu bestimmen. Wir führen hier unter anderen diejenigen von *Dulong* und *Arago* an, welche auf sehr weite Grenzen ausgedehnt worden sind und in neuerer Zeit von *Regnault* wiederholt wurden. Die folgende Tabelle ist ein Auszug aus den Resultaten, welche von diesem letzteren

Gelehrten erhalten wurden; sie gibt das Maximum der Spannkraft des gesättigten Wasserdampfes für die Temperaturen von 10 zu 10°, von 0° an bis 230° C. Die Spannungen sind ausgedrückt durch die Höhe der Quecksilbersäule, welcher sie das Gleichgewicht halten.

Tabelle 21. Temperatur und Spannkraft des Wasserdampfes.

Temperatur.	Spannkraft des Wasserdampfes.	Temperatur.	Spannkraft des Wasserdampfes.	Temperatur.	Spannkraft des Wasserdampfes.
	m.		m.		m.
0° C.	0,0046	80° C.	0,3546	160° C.	4,6516
10°	0,0092	90°	0,5254	170°	5,9617
20°	0,0174	100°	0,7600	180°	7,5464
30°	0,0315	110°	1,0754	190°	9,4427
40°	0,0549	120°	1,4913	200°	11,6890
50°	0,0920	130°	2,0303	210°	14,3248
60°	0,1488	140°	2,7176	220°	17,3904
70°	0,2331	150°	3,5812	230°	20,9264

Man sieht aus dieser Tabelle, dass das Maximum der Spannkraft des Wasserdampfes mit der Temperatur wächst, und zwar mit einer Schnelligkeit, welche um so grösser wird, je höher die Temperatur steigt. Zugleich wird man auch bemerken, dass die Maximalspannung des Wasserdampfes bei 100° durch eine Quecksilbersäule von $0^m,76$, d. h. von der Höhe gemessen wird, welche dem normalen Druck der freien atmosphärischen Luft entspricht (§. 301); dies kann auch nach dem, was wir soeben bezüglich des Siedens gesagt haben, gar nicht anders sein; denn die Temperatur von 100° C. ist eben diejenige, bei welcher das Wasser unter einem Drucke, der durch eine Quecksilbersäule von $0^m,76$ gemessen wird, kocht.

Da die Spannkraft des Dampfes bei den Dampfmaschinen gewöhnlich in Atmosphären (§. 301) angegeben wird, so ist es wichtig die Temperatur zu kennen, für welche das Maximum der Spannkraft des Dampfes gleich einer gegebenen Zahl von Atmosphären ist. Desshalb geben wir hier noch die folgende Tabelle, welche aus den von *Regnault* erhaltenen Resultaten abgeleitet ist, und welche die Temperaturen enthält, die den Spannungen von 1 bis 28 Atmosphären entspricht.

57*

Tabelle 22. Spannkraft und Temperatur des Wasserdampfes.

Spannkraft des Dampfes.	Temperatur.	Spannkraft des Dampfes.	Temperatur.
Atmosph.		Atmosph.	
1	100°,0 C.	15	198°,0 C.
2	120,6	16	201,9
3	133,9	17	204,9
4	144,0	18	207,7
5	152,2	19	210,4
6	159,2	20	213,0
7	165,3	21	215,5
8	170,8	22	217,9
9	175,8	23	220,3
10	180,3	24	222,5
11	184,5	25	224,7
12	188,4	26	226,8
13	192,1	27	228,9
14	195,5	28	230,9

§. 459. Der Uebergang des Wassers in den dampfförmigen Zustand erfordert eine bedeutende Menge von Wärme, welche lediglich dazu angewendet wird, die Aenderung des Aggregatzustandes hervorzubringen, ohne dass die Temperatur dabei erhöht wird; diese Wärme wird in der Physik gebundene Wärme des Wasserdampfes genannt und durch diejenige Menge Wärme, als Einheit, gemessen, welche ein Kilogramm Wasser nöthig hat, um von 0° bis 1° C. erwärmt zu werden. Wenn hierauf der Dampf sich wieder condensirt und in den flüssigen Zustand zurückkehrt, so wird dieselbe Menge Wärme wieder frei und macht sich durch die Erhöhung der Temperatur der Körper fühlbar, mit welchen dieser Dampf in Berührung ist. Es folgt daraus, dass mehrere der Erscheinungen, welche wir oben angegeben haben, nicht ganz so einfach vor sich gehen, als man auf den ersten Anblick glauben könnte; denn die Verdampfung des Wassers, sowie die Condensation des Dampfes suchen immer eine bedeutende Veränderung der Temperatur hervorzubringen.

Eine Wassermasse, welche schneller oder langsamer verdampft und nicht in Verbindung mit einer Wärmequelle steht, erfährt nothwendig eine Erniedrigung ihrer Temperatur. Die

Maximalspannung des Dampfes, welcher sich über der Flüssigkeit bildet, ist also nicht diejenige, welche der Temperatur entspricht, die sie anfangs besass; sie ist geringer, weil die Flüssigkeit in dem Maasse, als die Verdampfung stattfindet, abgekühlt wird. Eine gewisse Menge Wasser, die eine Temperatur von 100° C. hat, wird in's Kochen kommen, wenn sie mit der freien atmosphärischen Luft in Verbindung steht; aber das Kochen wird sofort wieder aufhören, weil die Temperatur der Flüssigkeit in Folge der Dampfbildung rasch unter 100° herabsinkt. Um also das Kochen zu unterhalten, ist es nothwendig, der Wassermasse fortwährend neue Mengen Wärme zuzuführen; und die Menge des Dampfes, welcher sich in einer gegebenen Zeit bildet, ist mehr oder weniger gross, je nachdem die Menge der Wärme, welche in derselben Zeit dem Wasser wieder ersetzt wird, grösser oder kleiner ist.

Man sieht daraus, dass es von grosser Wichtigkeit ist, die Menge der Wärme zu kennen, die zur Verdampfung einer bestimmten Wassermasse erforderlich ist, und zwar für die verschiedenen Temperaturen, bei welchen man die Verdampfung ausführen kann. Wir geben hier desshalb noch die folgende Tabelle, die wie die anderen den Untersuchungen entnommen ist, welche *Regnault* über die Eigenschaften des Wasserdampfes angestellt hat.

Tabelle 23. Gebundene und gesammte Wärme des Wasserdampfes.

Temperatur des gesättigten Dampfes.	Gebundene Wärme.	Gesammte Wärme.	Temperatur des gesättigten Dampfes.	Gebundene Wärme.	Gesammte Wärme.
0° C.	606,5	606,5	120° C.	522,3	643,1
20°	592,6	612,6	140°	508,0	649,2
40°	578,6	618,8	160°	493,6	655,3
60°	564,7	624,8	180°	479,0	661,4
80°	550,6	630,9	200°	464,3	667,5
100°	536,5	637,0	220°	449,4	673,6

Die zweite Columne dieser Tabelle enthält die Menge der Wärme, welche nothwendig ist, um ein Kilogramm Wasser aus dem flüssigen Zustand in den des gesättigten Dampfes überzu-

führen, ohne dass dabei eine Aenderung der Temperatur stattfindet, welche nach wie vor der Verdampfung die gleiche, nämlich die in der ersten Columne angegebene, ist. Die dritte Columne gibt die Menge Wärme, welche nothwendig ist, um ein Kilogramm Wasser von 0^{0} in gesättigten Dampf von der Temperatur zu verwandeln, die in der ersten Columne angegeben ist. Die Einheit der Wärme ist, wie oben schon gesagt, die Wärmemenge, welche nothwendig ist, um ein Kilogramm Wasser von 0^{0} bis 1^{0} C. zu erwärmen.

§. 460. **Die Newcomen'sche atmosphärische Maschine.** — Die erste Dampfmaschine, welche der Industrie wirkliche Dienste geleistet hat, ist die von *Newcomen*, welche gewöhnlich mit dem Namen der atmosphärischen Maschine bezeichnet wird. Diese Maschine datirt vom Jahre 1705. Sie ist eigentlich nur die Verwirklichung einer schon von *Papin* im Jahre 1690 ausgesprochenen Idee.

Die Fig. 589 zeigt die Einrichtung dieser Maschine, welche zum Heben des Wassers in Bergwerken angewandt wurde und an gewissen Orten sogar heute noch angewandt wird. Ein Kessel A ist dazu bestimmt, den Dampf zu erzeugen; er hat die Form einer Halbkugel, die unten in einen ebenen Boden endigt, und ist mit einem Sicherheitsventil versehen. Der in dem Kessel gebildete Dampf kann durch eine Verbindungsröhre in den oben offenen Cylinder B gelangen. In dieser Röhre ist ein Hahn angebracht, dessen Kopf von einer Art von Rad *a* gebildet wird und mittelst dessen die Verbindung des Kessels mit dem Cylinder abwechselnd hergestellt und wieder unterbrochen werden kann. Der Kolben C, der sich in dem Cylinder B bewegen kann, ist mittelst einer Kette mit dem einen Ende eines Balanciers D verbunden, der um seine Mitte drehbar ist. Das andere Ende des Balanciers trägt, gleichfalls mittelst einer Kette, eine lange Stange E, welche in den Schacht des Bergwerks hinabreicht und dazu bestimmt ist, die Pumpen zu bewegen; es ist dies das Kunstgestänge, von welchem wir bei Gelegenheit der Bergwerkspumpen (§. 414) schon gesprochen haben.

Wenn der Hahn *a* offen ist, so drückt der Dampf von unten nach oben auf den Kolben C und hält dem atmosphärischen Druck, welcher auf die obere Fläche desselben stattfindet, das Gleichgewicht; die Stange E geht alsdann in Folge ihres eigenen Gewichtes und des Gegengewichtes F abwärts, indem sie den Kolben C zwingt, aufwärts bis an das obere Ende des Cylinders B zu steigen. Wenn man hierauf den Hahn *a* schliesst

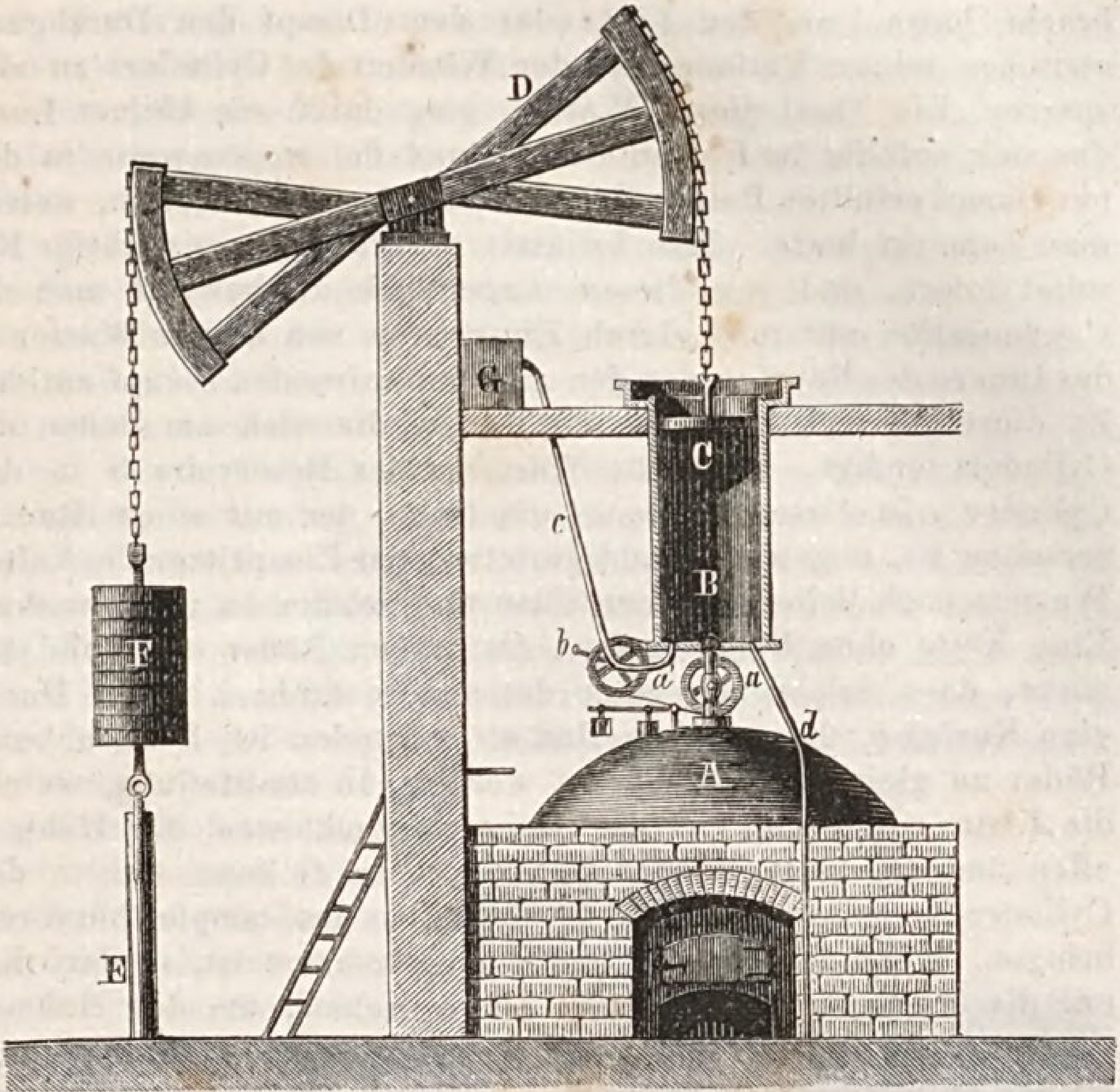


Fig. 589.

und durch irgend ein Mittel die Condensation des in B enthaltenen Dampfes bewirkt, so wird der Druck der atmosphärischen Luft, welcher auf der oberen Fläche des Kolbens C lastet, nicht mehr durch die Spannung des Dampfes im Gleichgewicht gehalten; der Kolben geht also abwärts und hebt so das Gestänge E. Durch diesen zweiten Theil der Bewegung des Kolbens kann eine beliebige Menge von Arbeit hervorgebracht werden; man darf nur die Fläche dieses Kolbens hinreichend gross machen.

Um die Condensation des Dampfes im Cylinder B zu bewirken, wandte man anfangs ein Mittel an, welches darin bestand, kaltes Wasser mit der äusseren Fläche des Cylinders in Berührung zu bringen. Aber dieses Mittel wirkte nur langsam. Eines Tages bemerkte man, dass die Condensation mit einer viel grösseren Schnelligkeit als gewöhnlich hervorgebracht wurde. Indem man die Ursache davon aufsuchte, erkannte man, dass sie von dem Wasser herrührte, welches man über den Kolben ge-

bracht hatte, um der Luft oder dem Dampf den Durchgang zwischen seinem Umfang und den Wänden des Cylinders zu versperren. Ein Theil dieses Wassers ging durch ein kleines Loch, das sich zufällig im Kolben befand, und fiel tropfenweise in den mit Dampf erfüllten Raum: daher die rasche Condensation, welche man bemerkt hatte. Man benützte natürlich dieses wichtige Resultat sofort, und von diesem Augenblick an bewirkt man die Condensation nur noch durch Einspritzen von kaltem Wasser in das Innere des Raumes, der den zu condensirenden Dampf enthält. Zu diesem Zweck leitet eine Röhre *c*, die sich am Boden des Cylinders endigt, das kalte Wasser eines Reservoirs G in den Cylinder. In dieser Röhre ist ein Hahn, der mit einem Rad *a'* versehen ist, angebracht und gestattet, das Einspritzen des kalten Wassers nach Belieben herzustellen und wieder zu unterbrechen. Eine Kette ohne Ende umfasst die beiden Räder *a*, *a'* und bewirkt, dass sich keines ohne das andere drehen kann. Durch eine Kurbel *b*, die mit dem Rad *a'* verbunden ist, können beide Räder zu gleicher Zeit gedreht werden. In der Stellung, welche die Figur voraussetzt, ist der Hahn *a* geschlossen, der Hahn *a'* offen und das kalte Wasser des Reservoirs G kann sich in den Cylinder B ergiessen, um die Condensation des Dampfes hervorzubringen. Wenn der Kolben C unten angekommen ist, so darf man nur die Kurbel *b* in passendem Sinne drehen, um den Hahn *a'* zu schliessen und den *a* zu öffnen. Alsdann steigt der Kolben C wieder aufwärts; dann bringt man die Kurbel in ihre erste Stellung zurück, der Kolben C geht wieder abwärts u. s. f. Eine am Boden des Cylinders B angebrachte Oeffnung steht mit einer Röhre *d* in Verbindung, die dazu bestimmt ist, das Wasser zu entfernen, welches sich nach und nach am Boden des Cylinders ansammelt; indem man einen Hahn, der an dieser Röhre angebracht ist, öffnet, kann man dieses Wasser von Zeit zu Zeit durch dieselbe abfliessen lassen.

§. 461. **Einfach wirkende Watt'sche Dampfmaschine.** Noch bis zur Mitte des vorigen Jahrhunderts, ungefähr bis zum Jahre 1769, waren alle Versuche, den Wasserdampf als bewegende Kraft zu benützen, von sehr geringem praktischen Erfolg begleitet. Die Dampfmaschinen lagen bis dahin noch in ihrer Kindheit. Aber zu jener Zeit trat der Engländer *Watt* auf und brachte diese Maschinen rasch auf einen hohen Grad von Vollkommenheit. Unter seinen Händen wurde die Dampfmaschine, die bis dahin nur zur Hebung des Wassers angewandt worden war, ein Universalmotor, der im Stande ist, die thierischen Motoren in allen Verhältnissen, wo eine Kraft zur Hervorbringung einer Arbeit entwickelt werden

soll, zu ersetzen. Wir werden Gelegenheit erhalten, die Erfindungen dieses berühmten Mechanikers — Erfindungen, die alle von der grössten Wichtigkeit sind — anzugeben, indem wir die einfach wirkenden sowohl als die doppelt wirkenden Maschinen, die er construirt hat, näher beschreiben.

Seine einfach wirkende Dampfmaschine construirte *Watt*, um die *Newcomen*'sche atmosphärische Maschine zu ersetzen (§. 460). Sie besteht wie die atmosphärische Maschine im Wesentlichen aus einem Cylinder, in welchem sich ein Kolben abwechselnd von unten nach oben und von oben nach unten bewegt. Die Stange dieses Kolbens ist gleichfalls mit einem der Enden eines Balanciers verbunden, welcher seine hin- und hergehende Bewegung einer Pumpenstange mittheilt, die am anderen Ende befestigt ist. Bei der Maschine von *Watt* sowohl wie bei derjenigen von *Newcomen* steigt der Kolben in dem Cylinder allein durch die Wirkung des Gewichtes des Pumpengestänges, welche Wirkung durch Vermittlung des Balanciers auf ihn übertragen wird; die abwärtsgehende Bewegung dieses Kolbens dagegen wird durch den Unterschied der Drückungen, welche er auf seiner oberen und unteren Fläche erfährt, hervorgebracht. Aber die Gleichheit der Drückungen auf beiden Seiten des Kolbens während seiner aufsteigenden, und der Unterschied dieser Drückungen während seiner niedergehenden Bewegung werden bei beiden Maschinen nicht auf dieselbe Art erhalten.

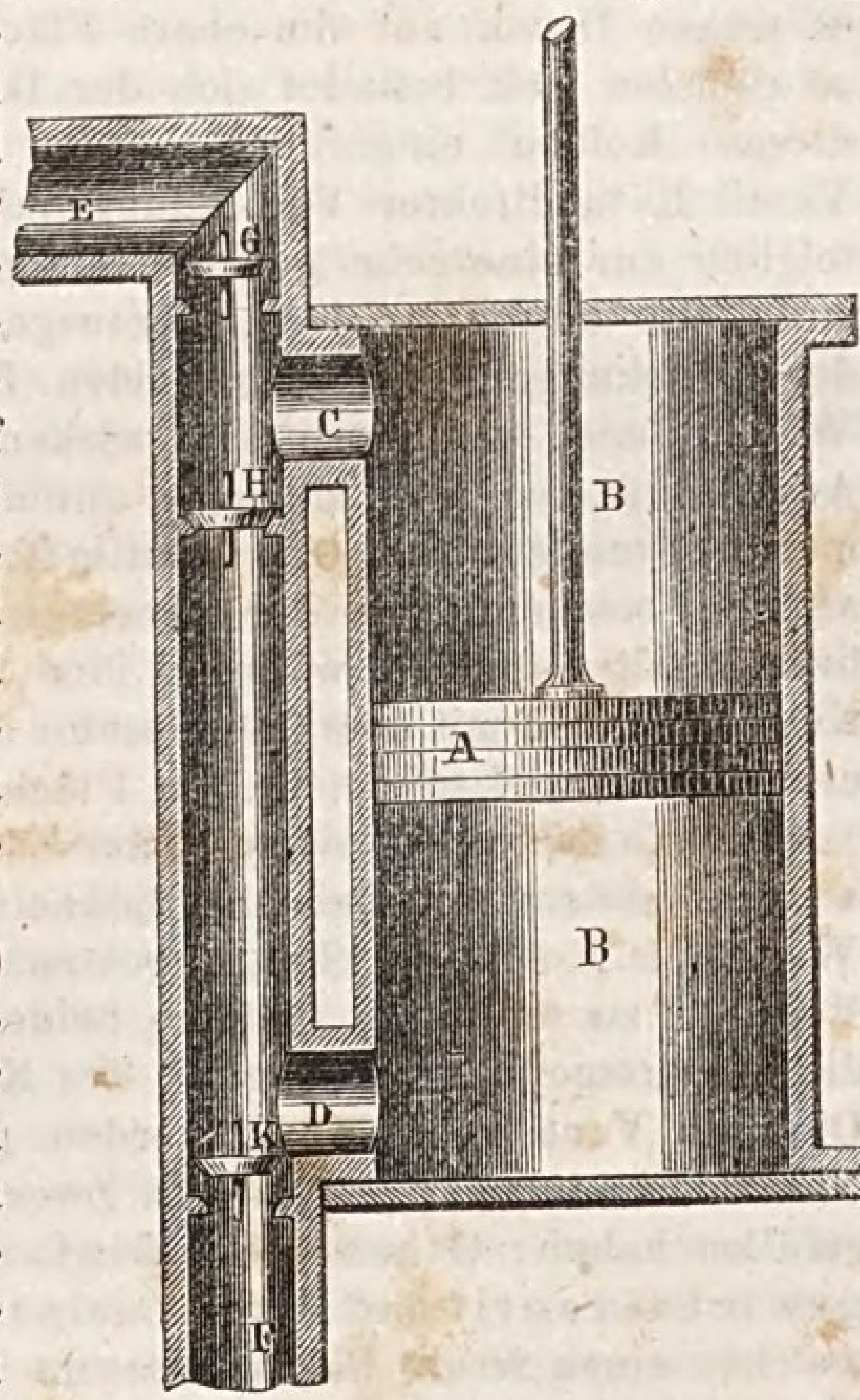


Fig. 590.

Der Kolben A (Fig. 590) der *Watt*'schen Maschine bewegt sich in einem Cylinder B B, der an seinen beiden Enden geschlossen ist. Oben und unten an diesem Cylinder befinden sich zwei Oeffnungen C, D und setzen ihn mit einer weiten Seiten-

röhre EF in Verbindung, welche drei Ventile G, H, K enthält. Der Dampf, welcher sich im Kessel bildet, wird durch eine Röhre, die bei E endigt, über das Ventil G geleitet. Nachdem er seine Wirkung, die wir sogleich näher angeben werden, in dem Cylinder hervorgebracht hat, dringt dieser Dampf durch das Ventil K und strömt durch den unteren Theil F der Seitenröhre in einen besonderen Raum, welcher der Condensator genannt wird. Ein Strahl kalten Wassers, welcher in Form eines feinen Regens in dem Moment, wo der Dampf im Condensator ankommt, in diesen herabfällt, nimmt dem Dampf fast augenblicklich beinahe seine ganze Spannkraft.

Um die Bewegung des Kolbens A in dem Cylinder BB hervorzubringen, reicht es hin, die drei Ventile G, H, K in passenden Momenten abwechselnd zu öffnen und zu schliessen. Wenn die Ventile G und K geöffnet sind, das Ventil H aber geschlossen ist, so gelangt der Dampf, welcher aus dem Kessel kommt, durch die Oeffnung C oben in den Cylinder und kann so seinen Druck auf die obere Fläche des Kolbens A ausüben; zu gleicher Zeit befindet sich der Dampf, welcher vorher unter diesen Kolben eingeführt worden war, durch das geöffnete Ventil K in direkter Verbindung mit dem Condensator und hat folglich nur eine sehr geringe Spannung (§. 457). Der Kolben muss also abwärts gehen, vorausgesetzt, dass der Unterschied der Drückungen auf seine beiden Flächen im Stande ist, die Widerstände, welche an ihm wirken, zu überwinden. In dem Augenblick, wo der Kolben A unten in dem Cylinder angekommen ist, schliesst man die Ventile G, K und öffnet das Ventil H; alsdann communiciren der obere und der untere Theil des Cylinders mit einander, während ihre Verbindung sowohl mit dem Kessel als auch mit dem Condensator unterbrochen ist. Der Kolben erleidet also auf seinen beiden Flächen gleiche Drückungen und steigt ohne Schwierigkeit unter der Wirkung des Pumpengestänges, welches am anderen Ende des Balanciers befestigt ist, in die Höhe. Wenn der Kolben A oben angekommen ist, reicht es hin, das Ventil H zu schliessen und die beiden anderen zu öffnen, damit die abwärtsgehende Bewegung des Kolbens von Neuem beginnt. Die drei Ventile G, H, K werden gewöhnlich mit besonderen Namen bezeichnet, die an den Zweck erinnern, welchen sie zu erfüllen haben: G heisst das Einlassventil, H das Gleichgewichtsventil und K das Auslassventil. Ein viertes Ventil, welches einen Strahl kalten Wassers in den Condensator dringen lässt, öffnet und schliesst sich zugleich mit dem Auslassventil.

§. 462. Die Anwendung eines Condensators, d. h. eines besonderen Raumes, in welchem die Condensation des Dampfes durch Einspritzen von kaltem Wasser vor sich geht, bildet die wichtigste der Erfindungen *Watt's*. Um sich von ihrer Wichtigkeit zu überzeugen, darf man nur den Vorgang in der *Newcomen'*schen Maschine näher untersuchen. In dem Moment, wo der Kolben am oberen Ende seines Laufes angekommen ist, spritzt man kaltes Wasser in den Cylinder, um den darin enthaltenen Dampf zu condensiren und den Kolben wieder abwärts gehen zu machen. Aber dieses kalte Wasser erniedrigt zu gleicher Zeit die Temperatur der Cylinderwände und zwar in bedeutendem Grade. Wenn man hierauf den Kolben wieder emporsteigen machen will, so lässt man eine neue Quantität Dampf aus dem Kessel in den Cylinder. Da sich dieser Dampf in Berührung mit kalten Wänden befindet, so condensirt er sich sofort, und erst, wenn die Temperatur dieser Wände durch diese Condensation hinreichend erhöht worden ist, behält der Dampf in dem Cylinder eine Spannkraft, die gross genug ist, um dem Drucke der atmosphärischen Luft das Gleichgewicht zu halten und zu gestatten, dass der Kolben wieder in die Höhe geht. Man sieht daraus, dass die Wiedererwärmung der Cylinderwände bei jedem Kolbenhub eine grosse Menge Dampf erfordert, die rein verloren ist, und man begreift die grosse Wichtigkeit, welche es aus dem Gesichtspunkt der Ersparung von Brennmaterial haben muss, wenn dieser grosse Mangel der *Newcomen*'schen Maschine vermieden werden kann. Dies hat *Watt* in der That auf die glücklichste Weise durch Anwendung eines besonderen Condensators erreicht.

Die Anwendung des Dampfes, anstatt der atmosphärischen Luft, um auf die obere Fläche des Kolbens den zu seinem Niedergang erforderlichen Druck auszuüben, gestattet bei derselben Grösse des Kolbens die Hervorbringung einer grösseren Kraft. Zu diesem Zwecke reicht es hin, dem Dampf im Kessel eine Spannkraft, grösser als diejenige der atmosphärischen Luft, zu geben. Es folgt daraus, dass man, um eine Maschine von bestimmter Kraft zu construiren, dem Cylinder keine so grossen Dimensionen zu geben braucht als es bei der *Newcomen*'schen Maschine der Fall sein müsste.

Die einfach wirkenden *Watt*'schen Maschinen werden noch heute an manchen Orten angewandt. Man sieht zwei derselben in Paris in dem Wasserwerke von Gros-Caillou; sie dienen dazu, Wasser aus der Seine für den Gebrauch der Stadt, namentlich bei Feuersgefahr, zu heben. Wir begnügen uns jedoch damit,

das Princip derselben angegeben zu haben, ohne näher auf ihre Einrichtung einzugehen, und ziehen es vor, eine der einfach wirkenden Maschinen zu beschreiben, welche man gegenwärtig besonders in der Grafschaft Cornwallis in England zum Heben des Wassers aus den Bergwerken baut; es sind dies keine anderen als einfach wirkende *Watt*'sche Maschinen, an denen man allerdings erhebliche Verbesserungen angebracht hat. Bevor wir uns jedoch mit dieser Beschreibung beschäftigen, ist es nothwendig, zu erklären, was man unter der Expansion des Dampfes versteht.

§. 463. **Expansion des Dampfes.** — Wir haben gesagt, dass bei der *Watt*'schen Maschine (Fig. 590) das Zulassventil G während der ganzen Zeit, welche der Kolben zum Abwärtsgehen braucht, geöffnet bleibt. Während dieser Zeit kann der Dampf frei aus dem Kessel in den Cylinder übergehen; ausserdem liefert das fortgesetzte Kochen des Wassers im Kessel in jedem Augenblick so viel Dampf, dass der abgehende dadurch ersetzt wird; daraus folgt, dass die obere Fläche des Kolbens immer auf die nämliche Weise gedrückt wird. Setzen wir voraus, dass das Ventil G nur während eines Theils des Niedergangs des Kolbens geöffnet bleibe, dann wird von dem Augenblick an, wo es sich schliesst, die Dampfmenge, welche in dem oberen Theil des Cylinders enthalten ist, nicht mehr vermehrt. Der Dampf drückt jedoch nichtsdestoweniger fortgesetzt auf den Kolben und veranlasst ihn, weiter abwärts zu gehen; aber zu gleicher Zeit dehnt er sich aus und seine Spannkraft vermindert sich folglich mehr und mehr, was ihn jedoch bei passender Einrichtung der Maschine nicht hindert, den Kolben bis an's untere Ende des Cylinders zu schieben. In dem ersten Theil der niedergehenden Bewegung des Kolbens, so lange das Zulassventil G offen ist, sagt man, der Dampf wirke mit vollem Druck; von dem Augenblick an dagegen, wo das Zulassventil geschlossen ist, sagt man, der Dampf wirke mit Expansion.

Sehen wir nun, welchen Vortheil es bietet, wenn man den Dampf während eines Theils des Kolbenhubes mit Expansion wirken lässt, anstatt ihm fortwährend seinen vollen Druck zu belassen. Setzen wir, um einen bestimmten Fall vor Augen zu haben, voraus, dass sich das Zulassventil in dem Moment schliesse, wo der Kolben in der Mitte seines Hubes angekommen ist. Es ist wohl klar, dass in diesem Falle der Dampf nicht so viel Effekt hervorbringen kann, als wenn er während des ganzen Kolbenhubes mit vollem Drucke wirken würde. Dagegen wird aber

auch die Menge des verbrauchten Dampfes nur halb so gross als im letzteren Falle; der Verbrauch von Brennmaterial wird folglich gleichfalls auf die Hälfte reducirt, weil, alles Andere als gleich vorausgesetzt, die Menge des verbrauchten Brennmaterials offenbar proportional der erzeugten Dampfmenge ist. Um sich also zu überzeugen, ob es vortheilhaft ist, den Dampf mit Expansion wirken zu lassen, darf man sich nur versichern, ob durch dieses Mittel der Aufwand an Dampf oder Brennmaterial im grösseren Verhältniss als der erzeugte Effekt abnimmt. Dies ist aber leicht zu sehen. Denn die Quantität der Arbeit, welche durch die Wirkung des Dampfes auf den Kolben während der ersten Hälfte seines Hubes, d. h. also während das Zulassventil geöffnet ist, hervorgebracht wird, ist genau gleich der Hälfte derjenigen, welche geleistet werden würde, wenn der Dampf während des ganzen Kolbenlaufes mit vollem Druck wirken würde; die gesammte Arbeit des Dampfes während des ganzen Kolbenhubes übersteigt also die Hälfte von derjenigen, welche erzeugt worden wäre, wenn der Dampf fortwährend mit vollem Druck wirken würde, um die ganze Arbeit, welche während der Expansion des Dampfes entwickelt wird. Nun ist aber die Menge des Dampfes, welche in unserem angenommenen Fall bei Anwendung von Expansion gebraucht wird, gerade die Hälfte, als wenn man dieselbe nicht anwendet: indem man also den Dampf mit Expansion wirken lässt, vermindert man den Verbrauch an Dampf- und Brennmaterial im grösseren Verhältniss als die erzeugte Arbeit und erzielt also einen wirklichen Vortheil. Wenn man mit einer Expansionsmaschine dieselbe Arbeit leisten will als mit einer Maschine, wo der Dampf immer mit vollem Druck wirkt, so darf man nur den Cylinder der ersteren weiter als den der letzteren machen, und zwar in einem Verhältniss, das durch den Grad der Expansion, welchen man anwenden will, bestimmt wird; und dabei wird die erstere Maschine, trotzdem dass sie dieselbe Arbeit wie die zweite leistet, weniger Dampf, oder, was auf dasselbe hinausläuft, weniger Brennmaterial erfordern, um den für ihre Bewegung nothwendigen Dampf zu liefern.

Um uns eine klare Vorstellung von dem Vortheile, welcher aus der Anwendung des Dampfes mit Expansion folgt, zu verschaffen, wollen wir die Grösse der Arbeit angeben, welche die nämliche Masse Dampf leisten kann, je nachdem sie mit mehr oder weniger Expansion wirkt. Um einzusehen, wie diese Arbeit berechnet werden kann, kann man sich denken, dass der Kolben, während sich der Dampf ausdehnt, immer kleinere und kleinere

Drückungen erleidet, die dem *Mariotte*'schen Gesetze folgen; wenn man dann die ganze Dauer der Expansion in eine grosse Anzahl kleiner Theile zerlegt, sodass während jedes derselben der Druck als constant betrachtet werden kann, so erhält man die während der Expansion geleistete Arbeit, wenn man den Druck, welcher jedem jener Zeitintervalle entspricht, mit dem Weg, welcher während dieser Zeit durchlaufen wird, multiplicirt (§. 26) und die sämmtlichen so erhaltenen Produkte addirt. Zu dieser Summe die Arbeit hinzugefügt, welche der Dampf leistet, bevor die Expansion beginnt, gibt die gesammte erzeugte Arbeit. Auf diese Weise wurden die Zahlen der folgenden Tabelle erhalten, welche die verschiedenen Mengen von Arbeit gibt, welche eine und dieselbe Masse Dampf leisten kann, wenn sie mit vollem Druck, oder wenn sie mit Expansion wirkt, welche beginnt, nachdem der Kolben $^9/_{10}$, $^8/_{10}$, $^7/_{10}$ seines Hubes zurückgelegt hat. Als Einheit der Arbeit wurde diejenige angenommen, welche in dem Falle geleistet wird, wo der Dampf ohne Expansion wirkt.

Tabelle 24. Vergleichung der vom Dampfe ohne und mit Anwendung der Expansion geleisteten Arbeit.

Theil des Kolbenhubes, wo die Expansion beginnt.	Geleistete Arbeit.	Theil des Kolbenhubes, wo die Expansion beginnt.	Geleistete Arbeit.
1	1,000	0,5	1,693
0,9	1,105	0,4	1,916
0,8	1,223	0,3	2,204
0,7	1,357	0,2	2,609
0,6	1,509	0,1	3,302

Die Idee, den Dampf mit Expansion wirken zu lassen, rührt schon von *Watt* her. Sie wurde aber erst nach ihm bei der Construction der Dampfmaschinen angewendet.

§. 464. **Cornwaller Dampfmaschine.** — Die Maschinen, welche gegenwärtig in der Grafschaft Cornwallis zum Heben des Wassers aus den Bergwerken angewendet werden, sind wie schon oben gesagt, einfach wirkende *Watt*'sche Dampfmaschinen (§. 461), an welchen man bedeutende Verbesserungen, unter denen die

Anwendung der Expansion den ersten Rang einnimmt, angebracht hat. Die Figur 591 zeigt die Hauptansicht einer Maschine dieser Art. Der Kolben bewegt sich im Innern des Cylinders A. Seine

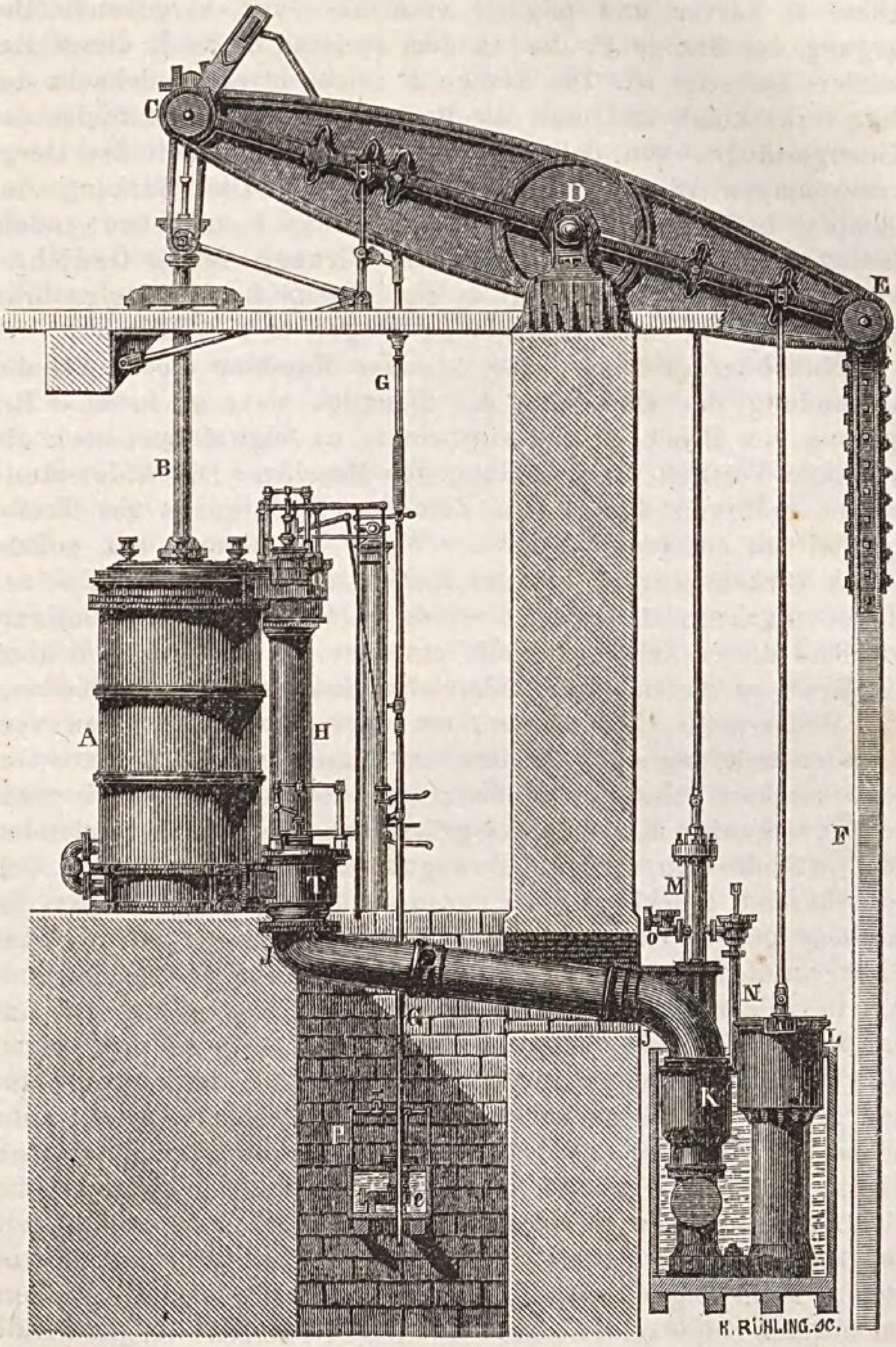


Fig. 591.

Stange B ist in C mit einem der Enden eines Balanciers C D E verbunden. Die hin- und hergehende Bewegung des Kolbens bringt eine oscillirende Bewegung des Balanciers um seine Achse D hervor und folglich eine hin- und hergehende Bewegung der Stange F, die an dem anderen Ende E dieses Balanciers befestigt ist. Die Stange F reicht in einen Schacht des Bergwerks hinab und muss die Pumpen bewegen; sie bildet das Kunstgestänge, von dem wir schon bei Gelegenheit der Bergwerkspumpen (§. 414) gesprochen haben. Die Wirkung des Dampfes hat nur den Zweck, das Gestänge F zu heben; indem darauf dieses Gestänge unter der Wirkung seines Gewichtes wieder abwärts geht, drückt es das Wasser in den Steigröhren der Pumpen in den verschiedenen Etagen in die Höhe.

Man begreift leicht, dass in einer Maschine dieser Art der Anwendung der Expansion des Dampfes nicht allein eine Ersparung von Brennmaterial entspricht; es folgt daraus noch ein wichtiger Vortheil für den Gang der Maschine. Die Widerstände wirken während der ganzen Zeit des Niedergangs des Treibkolbens mit constanter Stärke. Wenn der Dampf mit vollem Druck wirken würde, bis der Kolben am unteren Ende seines Hubes angekommen wäre, so würde daraus folgen, dass die Kraft während dieser Zeit gleichfalls constant bliebe. Nun soll aber die Kraft zu Anfang der niedersteigenden Bewegung des Kolbens die Widerstände überwiegen, um demselben, sowie den verschiedenen beweglichen Theilen der Maschine eine gewisse Geschwindigkeit geben zu können; es würde also die Kraft während des ganzen Kolbenlaufes grösser als die zu überwindenden Widerstände sein, und die Bewegung der Maschine würde sich fortwährend beschleunigen; daraus würde aber ein Stoss des Kolbens gegen den Boden des Cylinders hervorgehen, welcher Stoss vermieden werden muss, da er Nachtheile verschiedener Art in seinem Gefolge haben würde. Die Anwendung der Expansion des Dampfes beseitigt diesen Stoss. Es sei der Druck, welchen der Dampf gegen den Kolben ausübt, anfangs constant und grösser als die zu überwindenden Widerstände, darauf aber nehme er in Folge der Expansion ab, so dass er zu schwach wird, um den Widerständen das Gleichgewicht zu halten, so ist klar, dass sich die Bewegung des Kolbens in der ersten Zeit der Bewegung beschleunigen wird, um sich hierauf zu verzögern, und es kann folglich dahin gebracht werden, dass der Kolben am unteren Ende seines Hubes nur mit der Geschwindigkeit Null oder fast Null ankommt.

Die Maschine bewegt die verschiedenen, zu ihrem Gange nothwendigen Mechanismen selbst. Eine lange Stange G G, welche an dem Balancier aufgehängt ist und die man Steuerstange nennt, dient dazu, die Einlass-, Gleichgewichts- und Auslassventile zu richtiger Zeit zu öffnen und zu schliessen, wie wir es bald beschreiben werden. Die Röhre H setzt den oberen und unteren Theil des Cylinders A durch die Oeffnung des Gleichgewichtsventils hindurch mit einander in Verbindung, damit der Kolben unter der Wirkung des Gewichts des Gestänges F aufwärts gehen kann. Die Röhre J J verbindet den unteren Theil des Cylinders mit dem Condensator K, wenn das Auslassventil geöffnet ist. Der Condensator ist ein geschlossenes Gefäss, welches sich mitten in einem mit kaltem Wasser gefüllten Trog befindet und in welches das Wasser aus dem Trog in Form eines Strahls durch eine zu diesem Zweck angebrachte Oeffnung fortwährend einspritzt.

Eine Pumpe L, deren Kolben durch eine lange Stange mit dem Balancier C D E verbunden ist, dient dazu, das Wasser, welches sich in dem unteren Theil des Condensators ansammelt und das sowohl von dem eingespritzten Wasser als von dem condensirten Dampf herrührt, aus dem Condensator zu entfernen. Bei jedem Hub des Kolbens der Pumpe L wird nicht nur alles in dem Condensator enthaltene Wasser aus demselben gezogen, sondern dieser Kolben saugt auch noch gegen das Ende des Hubes einen Theil der in der Röhre J und im Condensator enthaltenen Luft aus. Desshalb trägt die Pumpe L auch den Namen Luftpumpe. Wenn diese Pumpe nur das Wasser aus dem Condensator entfernen würde, so würden sich immer grössere und grössere Mengen Luft darin ansammeln und es würde bald dahin kommen, dass der Druck im Condensator nicht geringer als der Druck der atmosphärischen Luft wäre; von da an würde die Condensation des Dampfes unnütz sein, weil man denselben Zweck erreichen würde, wenn man ihn in die freie Luft strömen liesse. Diese Luft, welche aus dem Condensator gesaugt werden muss, rührt theilweise von dem Einspritzwasser her, von welchem sie aufgelöst gehalten wird und aus welchem sie sich beim Erwärmen entwickelt, theilweise führt sie der Dampf mit sich, der sie aus dem Dampfkessel, wo sie gleichfalls in dem Wasser absorbirt war, mit herüber bringt.

Eine andere Pumpe M, welche gleichfalls durch die Maschine selbst bewegt wird, nimmt durch die Röhre N einen Theil des warmen Wassers, welches die Luftpumpe aus dem Condensator

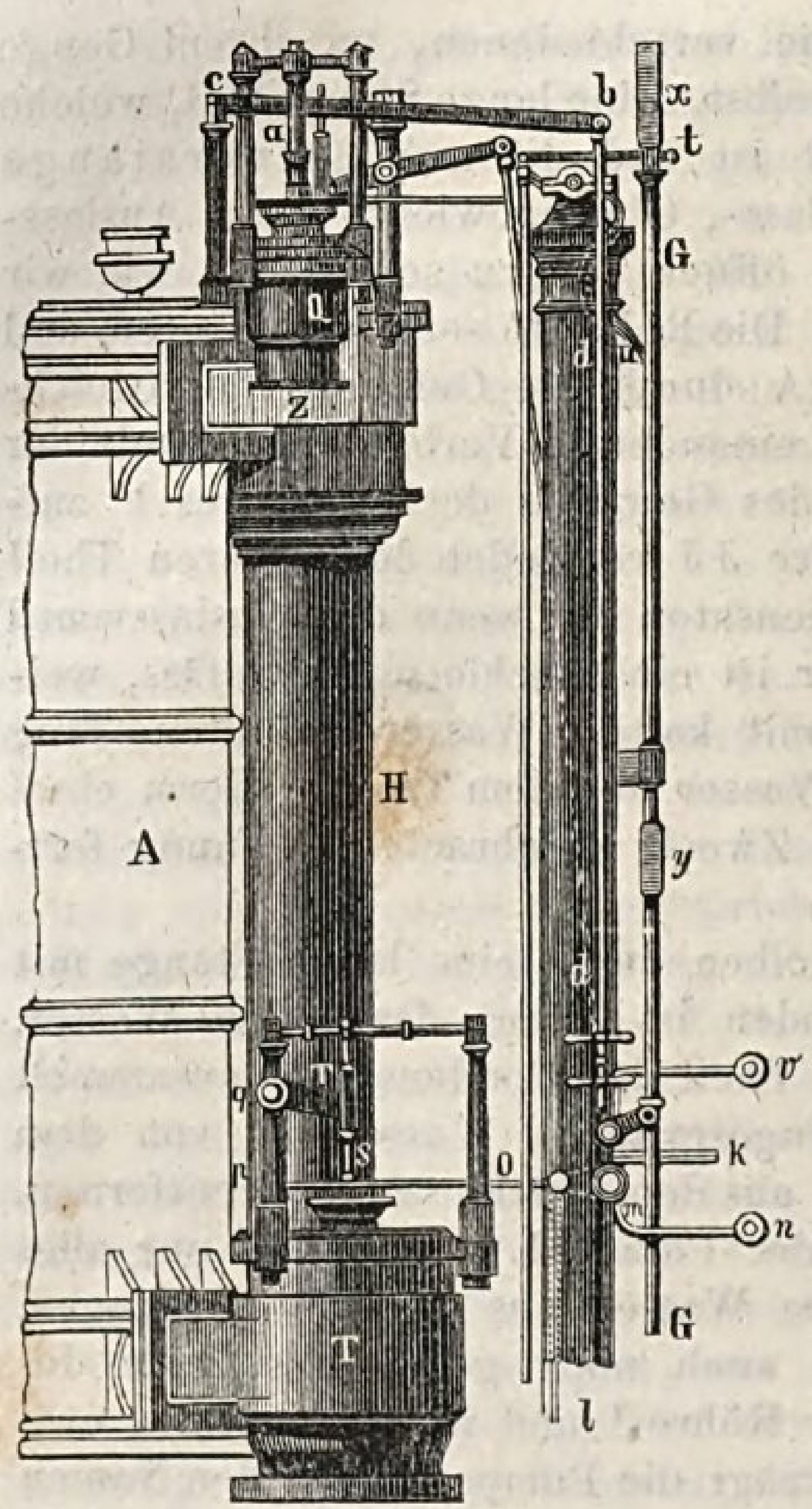


Fig. 592.

zieht, in Empfang und drückt es durch eine Röhre, welche sich bei O abzweigt, in den Dampfkessel. Dieses Wasser hat den Zweck, dasjenige, welches zur Dampferzeugung im Kessel verwendet wird, fortwährend wieder zu ersetzen und somit den Wasserstand im Kessel nahezu in gleicher Höhe zu erhalten.

§. 465. Sehen wir nun, auf welche Weise die Ventile durch die Maschine selbst abwechselnd geöffnet und geschlossen werden können. Zu diesem Zweck bedienen wir uns der Figuren 592 und 593, von denen die erste den Theil der Fig. 591, wo sich die zu beschreibenden Mechanismen befinden, in grösserem Maassstabe wieder gibt; die zweite ist der Grundriss desselben Theils der Maschine.

Man sieht bei Q einen cylindrischen Raum, in welchem sich ein erstes Ventil befindet, das dazu bestimmt ist, den Zufluss des Dampfes aus dem Kessel in den Cylinder zu reguliren, d. h. mehr oder weniger Dampf in den letzteren einströmen zu lassen, je nachdem die durch den Dampf zu überwindenden Widerstände grösser oder kleiner sind. Dieses Ventil, welches man das Regulirventil nennt, soll sich während des Ganges der Maschine weder öffnen noch schliessen; es soll im Gegentheil fortwährend die Lage behalten, welche man ihm anfangs gegeben hat, damit die niedersteigende Bewegung des Kolbens weder zu langsam noch zu schnell vor sich geht. Der Stiel *a* dieses Ventils geht durch den Deckel der Büchse Q, welche es enthält; ein Hebel *b c*, der an der Achse *c* befestigt ist, gestattet, diese Achse um sich selber zu drehen und dadurch den Stab *a* mittelst eines anderen Hebels, welchen diese Achse trägt, mehr oder

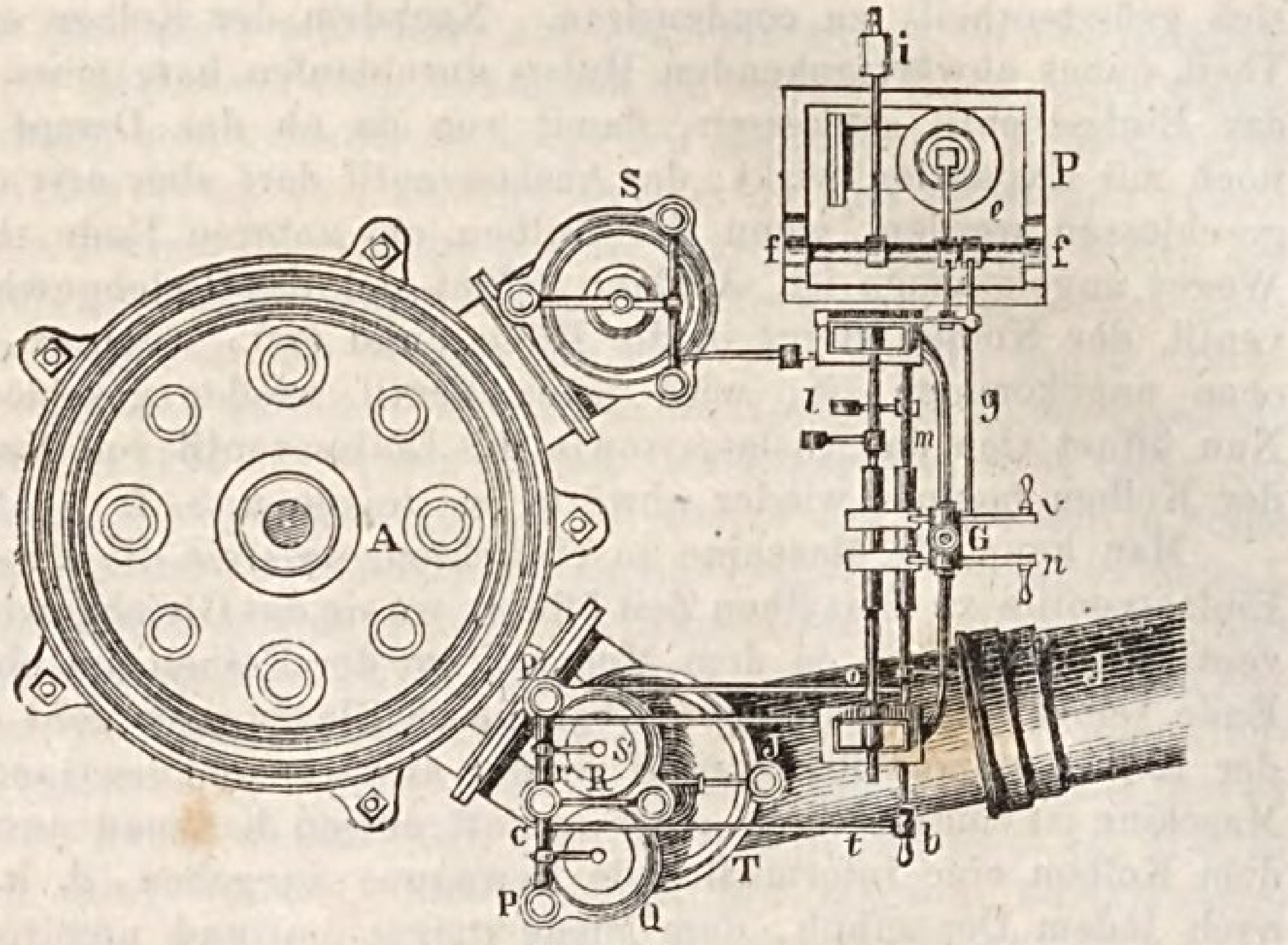


Fig. 593.

weniger zu heben; an dem Ende *b* des Hebels *b c* endlich ist eine Stange *d d* befestigt, die bis in das Bereich der Hände des Maschinenwärters herabgeht, sodass dieser ihr unteres Ende heben oder senken und dadurch dem Regulirventil eine passende Oeffnung geben kann.

Unter der Büchse Q bei Z mündet die Röhre ein, welche den Dampf aus dem Kessel in die Maschine leitet. Der Dampf geht also von unten nach oben durch die Oeffnung des Regulirventils. Von da aus strömt er in die Büchse R des Einlassventils, das sich neben dem vorhergehenden befindet, und gelangt in den oberen Theil des Cylinders, vorausgesetzt, dass dieses Ventil offen ist. Nachdem er auf den Kolben gewirkt und ihn abwärts gehen gemacht hat, tritt er aus dem oberen Theil des Cylinders durch die Büchse S des Gleichgewichtsventils, das hier unten in der Röhre H gelegen ist, und ergiesst sich durch diese Röhre in den unteren Theil desselben Cylinders, während welcher Zeit der Kolben in die Höhe geht. Endlich öffnet sich das bei T angebrachte Auslassventil und der Dampf geht aus dem Cylinder in die Röhre II, welche ihn zum Condensator leitet.

Wenn der Kolben eben abwärts zu gehen beginnt, so muss sich zunächst das Auslassventil öffnen und erst hierauf, einige Augenblicke später, das Einlassventil, damit in der Zwischenzeit der im unteren Theil des Cylinders enthaltene Dampf Zeit hat,

sich grösstentheils zu condensiren. Nachdem der Kolben einen Theil seines abwärtsgehenden Hubes durchlaufen hat, muss sich das Einlassventil schliessen, damit von da ab der Dampf nur noch mit Expansion wirkt; das Auslassventil darf aber erst dann geschlossen werden, wenn der Kolben am unteren Ende seines Weges angekommen ist. Alsdann öffnet sich das Gleichgewichtsventil, der Kolben steigt in die Höhe, und erst, wenn er ganz oben angekommen ist, wird jenes Ventil wieder geschlossen. Nun öffnet sich das Auslass- sowie das Einlassventil von Neuem, der Kolben beginnt wieder abwärts zu steigen u. s. f.

Man kann die Maschine so einrichten, dass sie die Aus- und Einlassventile zu derselben Zeit öffnet, wo sie das Gleichgewichtsventil schliesst, d. h. in dem Moment, wo der Kolben am oberen Ende seines Weges ankommt; bei dieser Einrichtung geht dann der Kolben unmittelbar darauf wieder abwärts und der Gang der Maschine ist continuirlich. Aber anstatt dessen hat man gesucht, dem Kolben eine intermittirende Bewegung zu geben, d. h. ihn nach jedem Doppelhub, dem niedersteigenden und unmittelbar darauf folgenden aufsteigenden, kürzere oder längere Zeit am oberen Ende seines Weges stillstehen zu lassen. Dieselbe intermittirende Bewegung hat dann natürlich auch die ganze Maschine; es ist übrigens nur die besondere Art der von der Maschine zu leistenden Arbeit, welche dazu geführt hat, ihr diese eigenthümliche Bewegung zu geben. Die durch das Kunstgestänge F bewegten Pumpen müssen das in dem Schachte enthaltene Wasser in dem Maasse ausschöpfen, als es durch die Spalten und Poren des Erdreichs und durch die verschiedenen Stollen, welche in diesem Schachte enden, eintritt; man begreift also, dass diese Pumpen möglicherweise nicht fortwährend in Thätigkeit zu sein brauchen, sondern dass ihre Kolben während jeder Stunde nur eine gewisse Anzahl von Hüben zu machen haben, die durch die Menge des Wassers bestimmt ist, welches sich während dieser Zeit in den Schacht ergiesst.

Um diese intermittirende Bewegung der Dampfmaschine hervorzubringen, lässt man die Aus- und Einlassventile nicht durch die Maschine selbst öffnen, sondern durch einen besonderen Apparat, welchen man in P (Figg. 591 u. 593) sieht und dem man den Namen Katarakt gibt. Dieser Apparat besteht im Wesentlichen aus einer Wasserpumpe e, welche inmitten eines mit Wasser gefüllten Troges steht. Die Kolbenstange dieser Pumpe ist mit einem Hebel verbunden, der an einer horizontalen Achse ff befestigt ist; ein anderer Hebel g ist auf der anderen

Seite gleichfalls mit dieser Achse in Verbindung. In dem Moment, wo der Kolben der Dampfmaschine am unteren Ende seines Weges ankommt, senkt die Steuerstange G G den Hebel *g*, dreht dadurch die Achse *ff* um eine gewisse Grösse um sich selbst und erhebt so den Kolben der Pumpe *e*. Ein Ventil, welches am Boden des Stiefels der Pumpe *e* angebracht ist, öffnet sich von aussen nach innen und lässt das Wasser aus dem Trog in den Stiefel treten und denselben anfüllen. Wenn nun der Kolben der Dampfmaschine wieder steigt, so ist der Kolben des Kataraktes nicht mehr der Wirkung der Steuerstange G G ausgesetzt und sucht nun in Folge seines eigenen Gewichtes, sowie auch in Folge des Gegengewichtes *i*, das an einem mit der Axe *ff* ein Stück bildenden Hebel befestigt ist, niederzugehen. Aber das Wasser, welches in den Pumpenstiefel des Katarakts gedrungen ist, kann nur durch eine Oeffnung austreten, welche man nach Belieben enger oder weiter machen kann; daraus folgt, dass der Kolben, indem er das Wasser durch diese Oeffnung hinausdrängt, nur langsam niedersteigen kann. Der Hebel *g* erhebt sich also gleichfalls langsam. Diese aufsteigende Bewegung des Hebels *g* ist es nun, welche man benützt, um zu passender Zeit die Aus- und Einlassventile zu öffnen, damit die Maschine einen neuen Kolbenhub beginnen kann. Man begreift demnach, dass man die Zeit, welche zwischen zwei auf einander folgenden Hüben des Kolbens der Maschine verfliesst, nach Belieben reguliren kann, indem man die Oeffnung, durch welche das Wasser aus dem Stiefel der Pumpe des Katarakts tritt, mehr oder weniger verengt und dadurch die aufsteigende Bewegung des Hebels *g* mehr oder weniger verlangsamt.

Wir werden nicht den ganzen Mechanismus, welcher dazu dient, die verschiedenen Ventile der Maschine zu gehöriger Zeit zu öffnen und zu schliessen, ausführlich und im Einzelnen beschreiben, sondern wir werden uns damit begnügen, denjenigen, welcher zum Ausslassventil gehört, vollständig kennen zu lernen; es wird dieses hinreichen, um sich über die Art und Weise Rechenschaft zu geben, wie sich die Maschine selbst bedienen kann, ohne wie bei den ersten Dampfmaschinen die Gegenwart eines besonderen Arbeiters zu erfordern, der damit beschäftigt ist, die Ventile zu stellen.

Eine vertikale Stange (Fig. 592 u. 593) stützt sich mit ihrem unteren Ende gegen den Hebel *g* des Katarakts; man sieht sie in Fig. 592 nicht, weil sie durch die Steuerstange G G verdeckt ist. Diese Stange steigt mit dem Hebel *g* langsam in die Höhe und wenn sie hinreichend gehoben ist, berührt ein Vorsprung,

welcher seitwärts an ihr sitzt, die untere Seite des kleinen horizontalen Hebels *k*. Indem hierauf die Stange fortfährt zu steigen, wird der Hebel *k* gehoben. Eine Stange *l*, welche an ihrem unteren Theil ein Gegengewicht trägt, ist mittelst eines Gelenks mit einem kleinen Hebel verbunden, der an einer horizontalen Achse *m* befestigt ist; sie sucht diese Achse fortwährend zu drehen, indem sie den Hebel, welcher sie trägt, niederdrückt. Aber die Achse *m* trägt eine Art von Zahn, der sich gegen einen anderen Zahn anlegt, welcher an der unteren Seite des Hebels *k* befestigt ist und welcher sich auf diese Weise der Drehung dieser Achse unter der Wirkung des Gegengewichts, das durch die Stange *l* getragen wird, widersetzt. Wenn aber der Hebel *k* durch den Stab, welchen der Katarakt emporsteigen macht, gehoben wird, so wird der Zahn der Achse *m* ausgelöst und diese Achse dreht sich nun, indem sie der Zugkraft, welche sie von Seiten des Stabes *l* erfährt, folgt. Alsdann hebt sich der an der Achse *m* befestigte Handgriff *n* und ein Stab *op*, mittelst eines Gelenks an einem kleinen Hebel, welchen gleichfalls diese Achse trägt, befestigt, wird plötzlich nach rechts gezogen; ein vertikaler Hebel *pq*, der in *p* mit dem Stab *op*, mittelst eines Gelenkes verbunden und an der horizontalen Achse *r* befestigt ist, wird zu derselben Zeit an seinem unteren Ende *p* nach rechts gezogen; indem sich dadurch die Achse *r* dreht, hebt sie einen andern Hebel, der gleichfalls an ihr befestigt ist; dieser letzte Hebel öffnet das Auslassventil, indem er den Stiel *s* desselben in die Höhe hebt.

Wenn das Auslassventil geöffnet ist, so fährt die vertikale Stange, welche der Hebel *g* des Kataraktes hebt, noch fort zu steigen und hebt bald den horizontalen Hebel *t* in die Höhe. Dieser Hebel spielt in Bezug auf das Einlassventil dieselbe Rolle wie der Hebel *k* in Bezug auf das Auslassventil; sobald er etwas gehoben wird, öffnet sich das Einlassventil unter der Wirkung eines Gegengewichts, welches zu gleicher Zeit den Handgriff *u* hebt. Alsdann steigt der Kolben unter der Wirkung des Dampfes nieder und die Steuerstange GG mit ihm. Ein langer Treiber *x*, der an der Steuerstange befestigt ist, senkt bald den Handgriff *u* und hält so das Einlassventil während des übrigen Theils des Kolbenschubes geschlossen, damit der Dampf nur mit Expansion wirkt. Wenn der Kolben am untersten Ende seines Weges ankommt, so drückt der Treiber *y* der Steuerstange den Handgriff *n* nieder, wodurch das Ausslassventil geschlossen wird. Zu gleicher Zeit senkt die Steuerstange GG den Hebel *g* des Katarakts; die

vertikale Stange, welche sich gegen diesen Hebel stützt, geht also gleichfalls abwärts und die Hebel k, t können sich senken, um sich von Neuem der Oeffnung des Ein- und Auslassventils zu widersetzen, bis der Katarakt diese Hebel wieder hebt. In dem Augenblick, wo der Handgriff n unter der Wirkung des Treibers y der Steuerstange in die Lage gebracht wird, welche die Figur zeigt, hängt die Achse m, indem sie sich dreht, ein Gegengewicht aus, welches das Gleichgewichtsventil öffnet und zu gleicher Zeit den Handgriff v senkt. Hierauf steigt der Kolben in die Höhe, die Steuerstange G G mit ihm, und wenn er im Begriff ist, am obersten Ende seines Schubes anzukommen, so erhebt die letztere mittelst eines Ansatzes, der in der Figur nicht sichtbar ist, den Handgriff v. Dadurch wird das Gleichgewichtsventil geschlossen und die Maschine bleibt vollständig stehen, bis der Katarakt von Neuem die Aus- und Einlassventile öffnet.

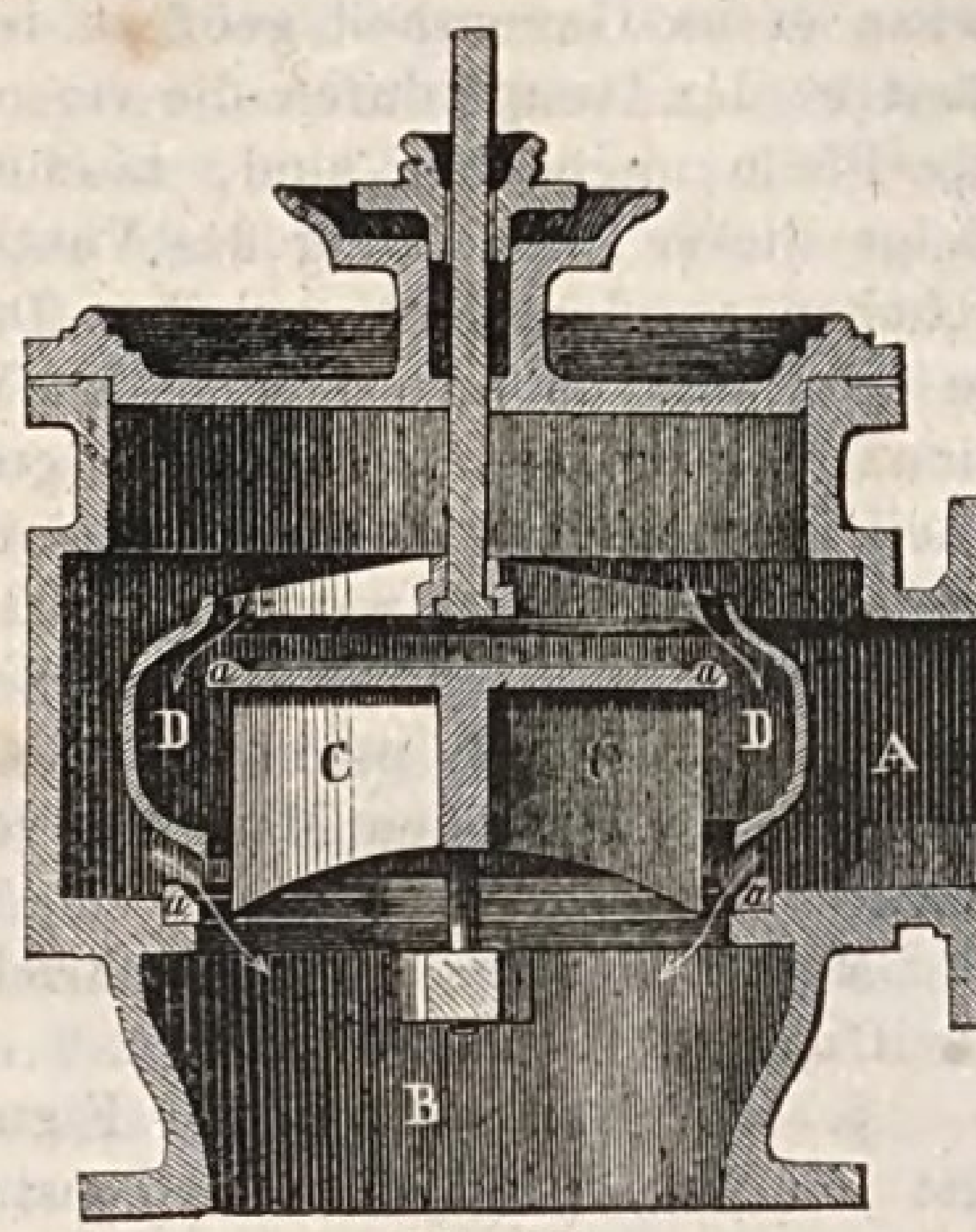
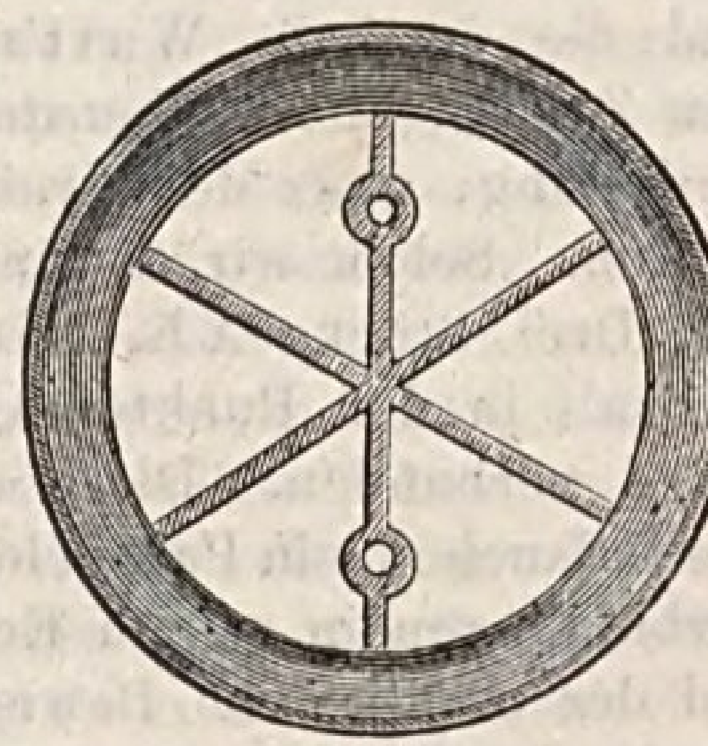


Fig. 594.

§. **466.** Bei den Maschinen, mit denen wir uns eben beschäftigen, hat man für die Einlass-, Gleichgewichts- und Auslassventile eine besondere Form gewählt, welche man kennen muss und die in Fig. 594 und 595 abgebildet ist. Ein zweckmässig eingerichtetes Ventil soll nämlich geöffnet werden können, ohne eine zu grosse Kraft zu erfordern, und soll dem Dampf einen möglichst weiten Durchgang gestatten, ohne dass es viel von seiner Stelle bewegt werden muss. Diese beiden Bedingungen werden durch die Ventile der Cornwaller Maschinen sehr gut erfüllt. Der Dampf soll von A nach B strömen können, wenn das Ventil geöffnet ist, während bei geschlossenem Ventil die Verbindung zwichen A und B unterbrochen sein soll. Man sieht bei C



559 Fig.

ein feststehendes Stück, das von sechs Scheidewänden gebildet wird, welche radial um eine mittlere Achse stehen und oben in eine kreisrunde Scheibe endigen, welche ein Stück mit diesen Scheidewänden bildet und die Zwischenräume, die zwischen denselben enthalten sind, bedeckt. Dieses feststehende Stück C, welches den Ventilsitz bildet, ist also an seinem ganzen Umfang durchbrochen, sodass es ungehindert den Dampf von A nach B übertreten lässt. Das Ventil D selbst ist eine Art von Scheide, welche den Ventilsitz C einhüllt und längs der äusseren Ränder seiner Scheidewände gleiten kann. Wenn es so viel als möglich gesenkt ist, so stützt es sich oben und unten gegen die konischen Ränder *a, a* der oberen kreisförmigen Scheibe und eines unten angebrachten Rings, welche Ränder nur eine geringe Breite haben; wenn es im Gegentheil geöffnet ist, wie es die Figur zeigt, so lässt es den Dampf durch die verschiedenen Wege, welche durch die Pfeile angegeben sind, hindurchgehen. Man sieht, dass in Folge dieser Einrichtung das Ventil nur um eine geringe Grösse gehoben werden darf, um dem Dampf einen weiten Durchgang zu eröffnen; da andererseits das Ventil an seinem oberen Theil eine Oeffnung besitzt, die fast so gross als die an seinem unteren Theil ist, so sucht es die Differenz der Spannkraft des Dampfes in A und B mit viel weniger Kraft auf seinem Sitz festzuhalten, als wenn es aus einer einfachen Scheibe mit konischen Rändern bestünde, wie wir es in der theoretischen Figur der einfach wirkenden *Watt*'schen Maschine vorausgesetzt haben. (Fig. 590, S. 905.)

Man nennt das eben beschriebene Ventil gewöhnlich kurz das Cornwall-Ventil.

§. 467. Man sieht in der Figur 591 (S. 911) eine besondere Art der Verbindung der Kolbenstange B mit dem Ende C des Balanciers. Diese Art der Verbindung, deren Erfinder *Watt* ist und die desshalb Watt'sches Parallelogramm heisst, hat den Zweck, die Kolbenstange bei ihrer auf- und absteigenden Bewegung, trotz der Kreisbewegung des Punktes C, gerade zu führen. Sehen wir, worin sie besteht.

Drei Stücke AB, CD, BD (Fig. 596) sind sowohl unter sich als in den Punkten A und C mit dem Balancier durch Gelenke verbunden. Diese drei Stücke bilden mit dem Theil AC des Balanciers ein Parallelogramm, welches in Folge der Gelenkverbindungen in seinen Ecken leicht seine Gestalt ändern kann. Bei der oscillirenden Bewegung des Balanciers um seine Achse O beschreibt das Ende A einen Kreisbogen, dessen Centrum in O ist.

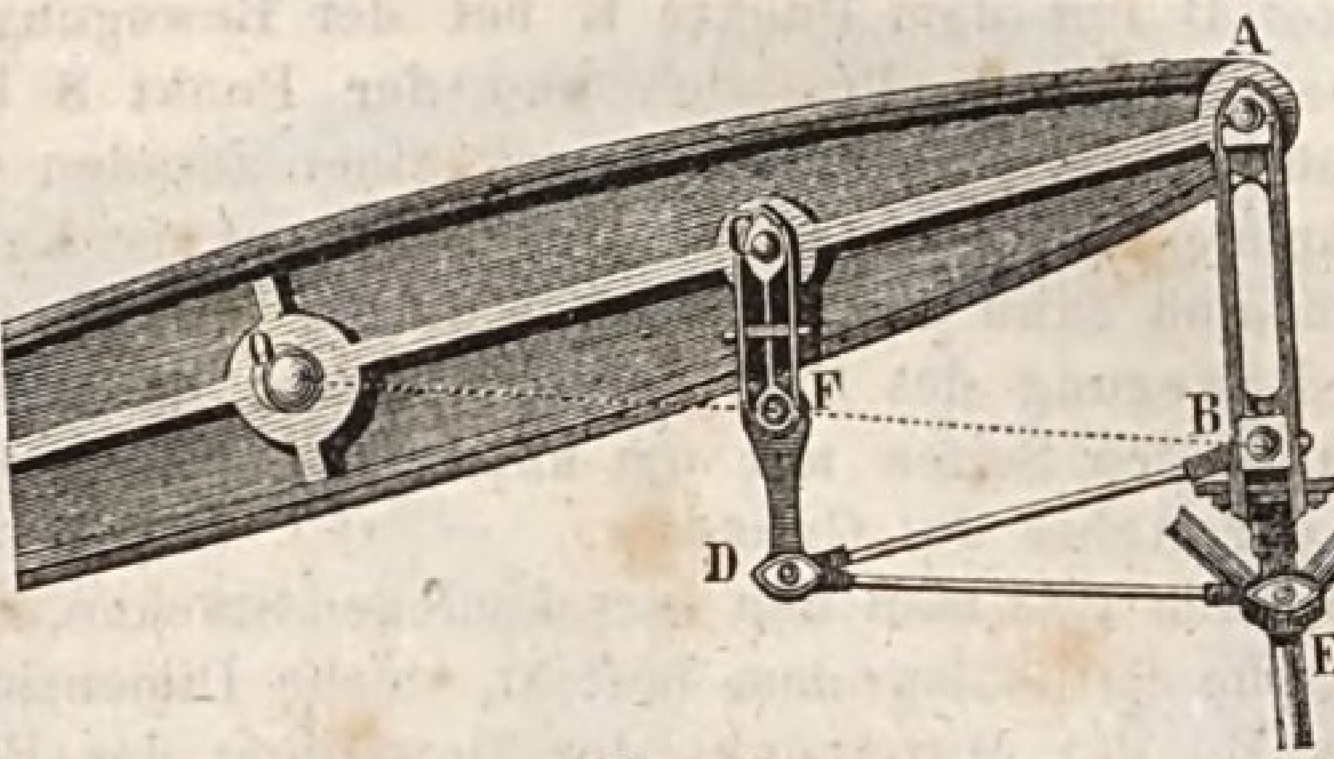


Fig. 596.

Der Punkt B würde gleichfalls einen Kreisbogen mit demselben Mittelpunkt beschreiben, wenn das Parallelogramm A B C D seine Gestalt nicht ändern würde. Aber in Folge der gegenseitigen Beweglichkeit der Stücke, aus denen es besteht, ist es begreiflich, dass man es in dem Maasse, als der Balancier sich bewegt, so umformen kann, dass sich der Punkt B nicht aus einer und derselben Vertikallinie entfernt. Wenn man ein Mittel finden würde, das Parallelogramm zu nöthigen, diese specielle Gestaltsveränderung anzunehmen, so könnte man in dem Punkte B das Ende der Stange eines Kolbens befestigen; diese Stange würde, indem sie zu gleicher Zeit, wie der Balancier schwingt, auf und nieder ginge, fortwährend dieselbe Richtung behalten, ohne dass ihr oberes Ende in Folge der Verbindung mit dem Balancier nach rechts oder links gedrückt würde. Dies erreichte *Watt* sehr nahezu auf eine ausserordentlich einfache Art. Er hatte bemerkt, dass, wenn man den Punkt B nöthigt, während einer ganzen Schwingung des Balanciers eine gerade vertikale Linie zu beschreiben, der Punkt D seinerseits eine krumme Linie beschreibt, welche sehr nahezu ein Kreisbogen ist; er schloss daraus, dass, wenn man den Punkt D nöthigt, den Kreisbogen, welcher fast vollständig mit jener Curve zusammenfällt, zu beschreiben, der Punkt B sich nicht merklich von der geraden Linie, welche man ihn vorher beschreiben liess, entfernen würde. Um aber den Punkt D zu zwingen, einen Kreisbogen zu beschreiben, darf man ihn offenbar nur mit dem Mittelpunkt E dieses Kreisbogens durch eine Art von kleinem Balancier verbinden. In Folge dieser Einrichtung bleibt die Ecke D des Parallelogramms immer in derselben Entfernung von dem festen Punkte E, welches auch die Lage ist, welche der Balancier einnimmt; das Parallelogramm ändert in Folge dieser Verbindung

des Punktes D mit dem Punkte E bei der Bewegung des Balanciers seine Gestalt allmählich und der Punkt B beschreibt eine krumme Linie, welche nahezu mit einer geraden vertikalen Linie zusammenfällt. Man kann also die Stange des Kolbens in B festmachen und dann entfernt sich während der hin- und hergehenden Bewegung des Kolbens im Cylinder das Ende seiner Stange zu beiden Seiten nur um unmerkliche Grössen von der Richtung der Achse des Cylinders.

Gewöhnlich gibt man den verschiedenen Stücken, aus denen das *Watt*'sche Parallelogramm besteht, solche Dimensionen, dass der Punkt E, der Mittelpunkt der Bewegung des Punktes D, auf der Richtung der geraden Linie liegt, welche der Punkt B beschreiben soll. In Fig. 591 sieht man ein Parallelogramm, bei welchem die Lage des Punktes E eine andere ist; er liegt in bedeutender Entfernung links von der Kolbenstange.

Es gibt in der Seite CD des *Watt*'schen Parallelogramms noch einen Punkt F, der die Eigenschaft besitzt, sich wie der Punkt B sehr nahezu nach einer geraden, vertikalen Linie zu bewegen. Dieser Punkt liegt in dem Durchschnittspunkt der Seite CD mit der geraden Linie, welche den Punkt B mit dem Mittelpunkt O der Bewegung des Balanciers verbindet. Man benützt gewöhnlich diesen Umstand, um die Bewegung des Balanciers auf den Kolben einer Pumpe zu übertragen, dessen Stange man in dem Punkte F befestigt. Der Weg, welchen dieser Punkt F beschreibt, ist offenbar viel kleiner als der des Punktes B.

§. 468. **Doppelt wirkende Watt'sche Dampfmaschine.** Die Dampfmaschine konnte erst dann eine so allgemeine Anwendbarkeit als Kraftmaschine wie die Wasserräder finden, wenn es möglich wurde, mittelst derselben die Rotationsbewegung einer Welle hervorzubringen: denn nur diese Bewegung kann auf alle Arten von Mechanismen übertragen werden und daher zur Ausführung aller Arten von Arbeiten dienen. Zu diesem Behufe ist es aber wichtig, dass der Dampf nicht intermittirend wirkt, wie es bei der einfach wirkenden Maschine der Fall ist, sondern er muss fortwährend auf den Kolben drücken und denselben vorwärts schieben, welches auch der Sinn ist, in welchem sich derselbe im Innern des Cylinders bewegt. Um diesen Zweck zu erreichen, hat *Watt* seine doppelt wirkende Dampfmaschine erdacht. Diese Maschine, welche wir nun beschreiben wollen, ist der Typus sowohl der Dampfmaschinen der verschiedensten Form, welche gegenwärtig in einer grossen Menge von Fabriken gebraucht werden, als auch der Treibapparate der Dampfschiffe,

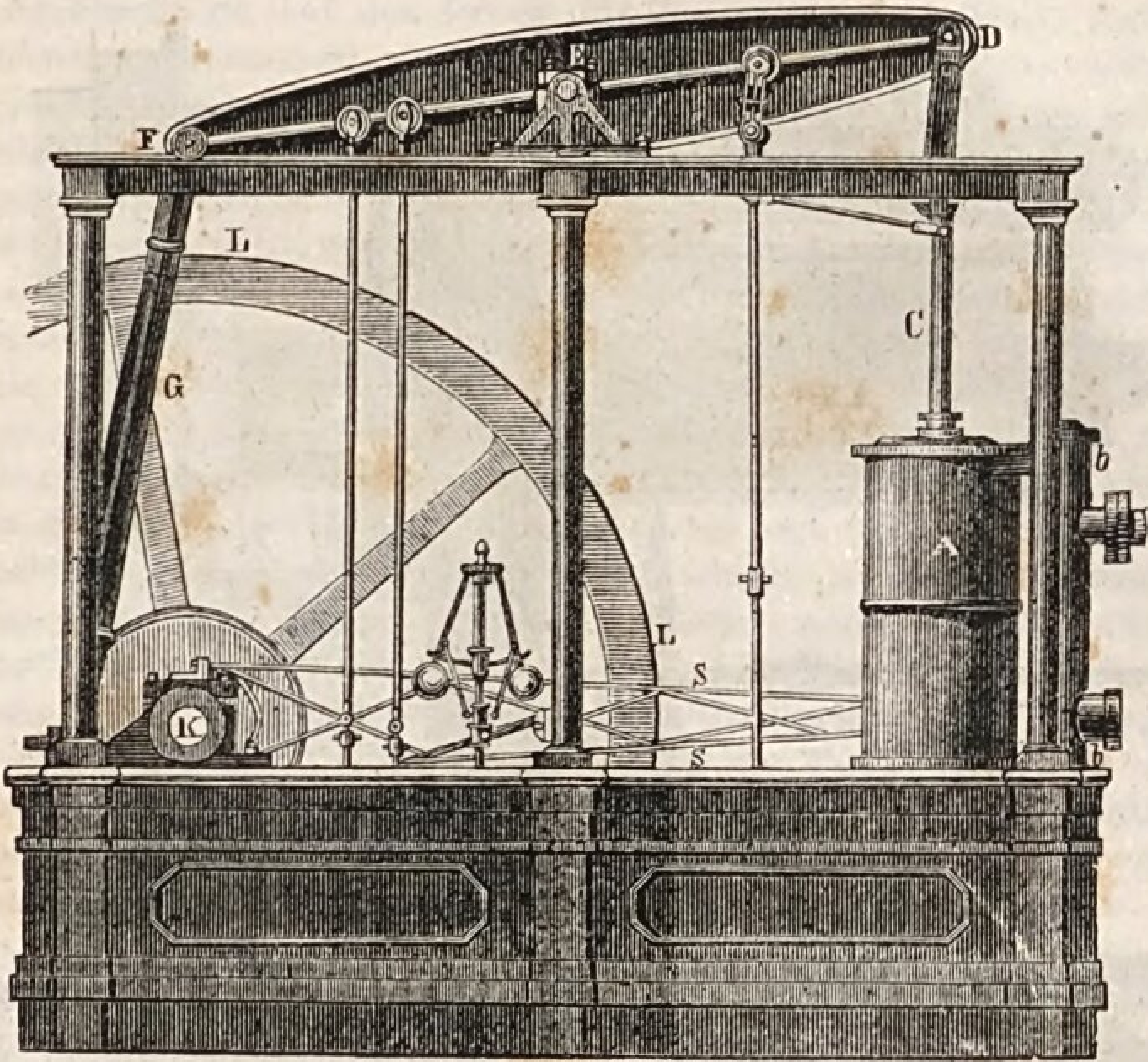


Fig. 597.

sowie der Lokomotiven, deren man sich auf den Eisenbahnen bedient, geworden.

Die Fig. 597 zeigt die Hauptansicht der *Watt*'schen Maschine; die Fig. 598 ist ein Durchschnitt derselben, in grösserem Maassstabe gezeichnet und dazu bestimmt, die inneren Theile sichtbar zu machen. Der Cylinder A ist an beiden Enden geschlossen; in seinem Innern bewegt sich der Kolben B bald in dem einen, bald im entgegengesetzten Sinn. Die Kolbenstange C ist mittelst des *Watt*'schen Parallelogramms mit dem Ende D des Balanciers DEF verbunden, und die hin und hergehende Bewegung des Kolbens bringt eine oscillirende Bewegung des Balanciers um seine Achse E hervor. Vom anderen Ende F des Balanciers geht eine Bleuelstange G herab, welche bei H den Zapfen einer Kurbel ergreift, die an dem Ende einer horizontalen Welle K befestigt ist. Die oscillirende Bewegung des Balanciers bringt eine hin- und hergehende Bewegung der Bleuelstange hervor, welche, indem sie auf die Kurbel wirkt, der Welle K eine stetige Rotationsbewegung mittheilt. Ein Schwungrad L, welches an der Welle K

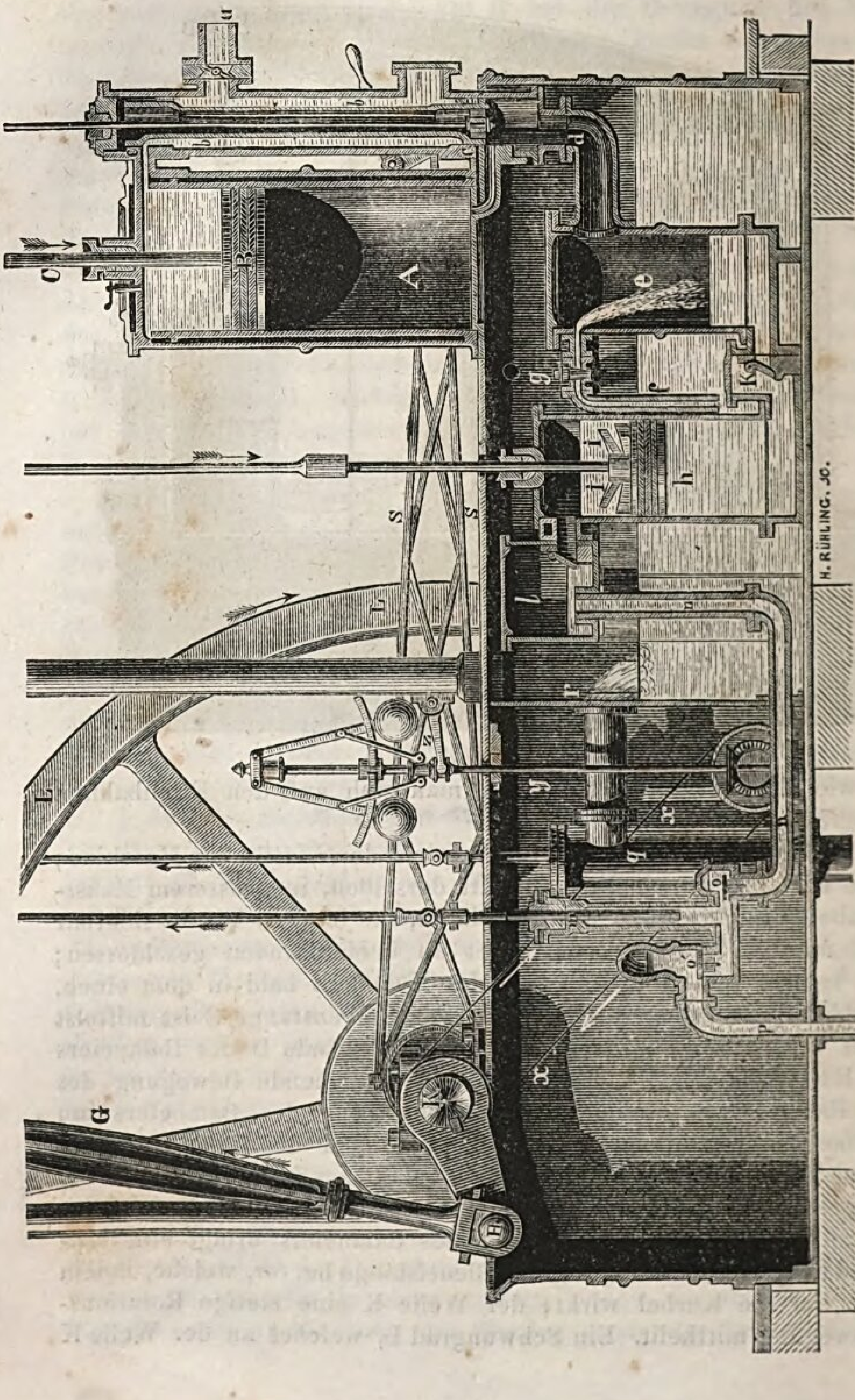


Fig. 598.

angebracht ist, hat den Zweck, die Bewegung dieser Welle regelmässiger zu machen, indem es die Unregelmässigkeiten, welche immer vorhanden sind, wenn eine Rotationsbewegung durch eine Bleuelstange und Kurbel hervorgebracht wird (§. 171), auf eine grössere Masse, die in grösserer Entfernung von der Achse der Welle gelegen ist, vertheilt. In Folge der Wirkung dieses Schwungrades überschreitet ausserdem die Welle leicht die Punkte, welche man todte Punkte nennt, d. h. die Stellungen, in welchen die Bleuelstange und der Kurbelarm dieselbe Richtung haben, sei es nun, dass sie sich gegenseitig decken, oder dass sich der letztere in der Verlängerung der ersteren befindet. Man sieht in der That, dass wenn die Welle in die eine oder andere dieser beiden Stellungen kommt, die Kraft, welche an der Bleuelstange im Sinne ihrer Länge wirkt, die Kurbel weder in dem einen, noch in dem anderen Sinne zu drehen sucht; die Welle kann also nur in Folge ihrer gewonnenen Geschwindigkeit fortfahren sich zu drehen, und diese Fortsetzung der Bewegung findet um so leichter statt, je grössere Massen von der Welle mit herum bewegt werden und mit je grösserer Geschwindigkeit dies geschieht (vergl. §. 176).

Der Dampf wird durch die Röhre *a* (Fig. 598) aus dem Kessel in den Cylinder geleitet. Diese Röhre mündet zunächst in einen Raum *b*, welchen man die Dampfkammer nennt, und von dem aus der Dampf vertheilt wird, sei es um oben, sei es um unten in den Cylinder zu gelangen, je nachdem der Kolben abwärts oder aufwärts geht. In der Dampfkammer bewegt sich ein besonderes Stück, der Schieber genannt, welches dazu bestimmt ist, den Dampf, welcher aus dem Kessel kommt, bald über, bald unter den Kolben zu leiten und zu gleicher Zeit den Theil des Cylinders, gegen welchen sich der Kolben bewegt, mit dem Condensator in Verbindung zu setzen. Die Fig. 599 zeigt den Schieber allein. Er besteht aus einer Art hohler Röhre, welche sich an beiden Enden erweitert und mit einer Stange versehen ist, die dazu gehört ihn in der Dampfkammer auf und ab zu bewegen. Die Figuren 600 und 601 zeigen die beiden Stellungen, welche der Schieber annehmen muss, je nachdem der Kolben ab- oder aufwärts geht. Man sieht, dass sich der Schieber mit den kleinen ebenen Stellen *c*,*c* gegen die ebenen Flächen stützt, welche sich zunächst den Oeffnungen befinden, die oben und unten in den Cylinder münden. An dem übrigen Theil seines Umfanges sind ausserdem gegen seine Enden hin Wergliderungen angebracht, sodass er auf allen Seiten genau an den Wänden der Dampf-

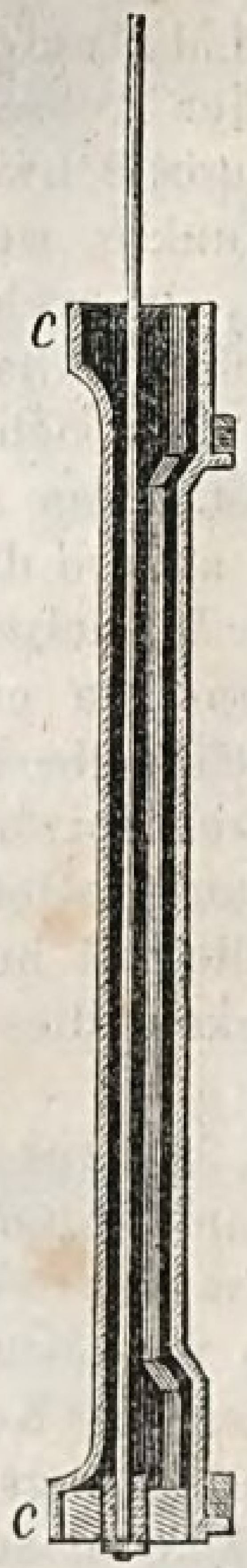


Fig. 599.

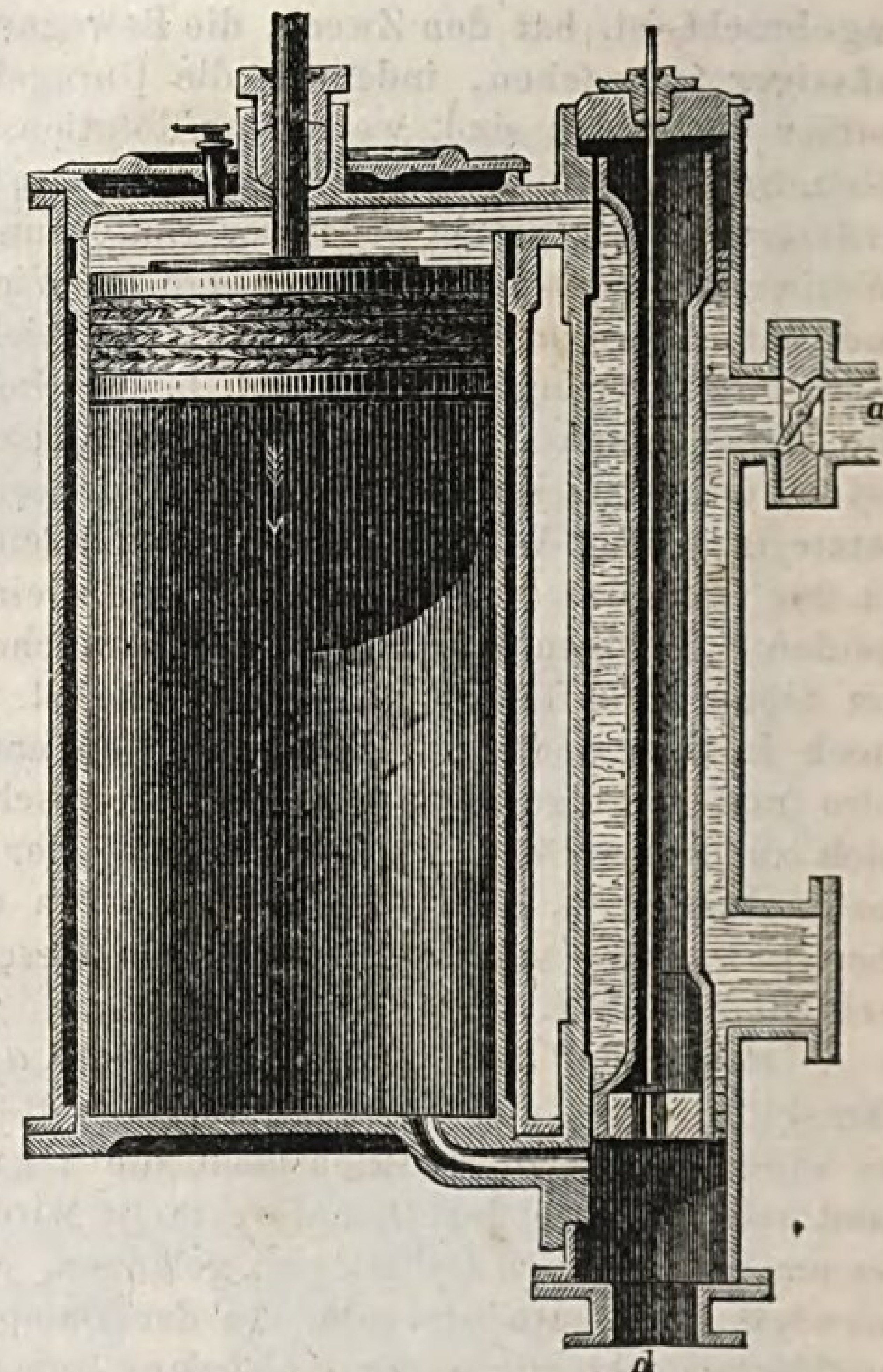


Fig. 600.

kammer anliegt. Auf diese Weise wird die Dampfkammer in zwei gänzlich getrennte Theile getheilt. Der eine dieser Theile, welcher von dem ringförmigen Raum rings um den Schieber gebildet wird, steht fortwährend mit der Röhre *a*, welche den Dampf zuleitet, in Verbindung. Der andere Theil, der aus den beiden Enden der Dampfkammer, die durch den hohlen Raum des Schiebers mit einander vereinigt werden, besteht, communicirt stets mit der Röhre *d* (Fig. 598), welche in den Condensator *e* mündet. Die Fig. 600 zeigt den Schieber in seiner obersten Stellung; der Dampf, welcher aus dem Kessel kommt, geht um den Schieber herum und strömt in den oberen Theil des Cylinders; der untere Theil desselben steht mit dem Condensator in Verbindung, und der Kolben geht folglich unter der Wirkung des Ueberschusses des Druckes, den er auf seiner oberen Fläche erfährt, abwärts.

Die Fig. 601 zeigt den Schieber in seiner tiefsten Stellung; der Dampf aus dem Kessel tritt unter den Kolben; derjenige, welcher sich über dem Kolben befindet, strömt, indem er den Schieber seiner ganzen Länge nach durchdringt, in den Condensator und der Kolben geht in die Höhe.

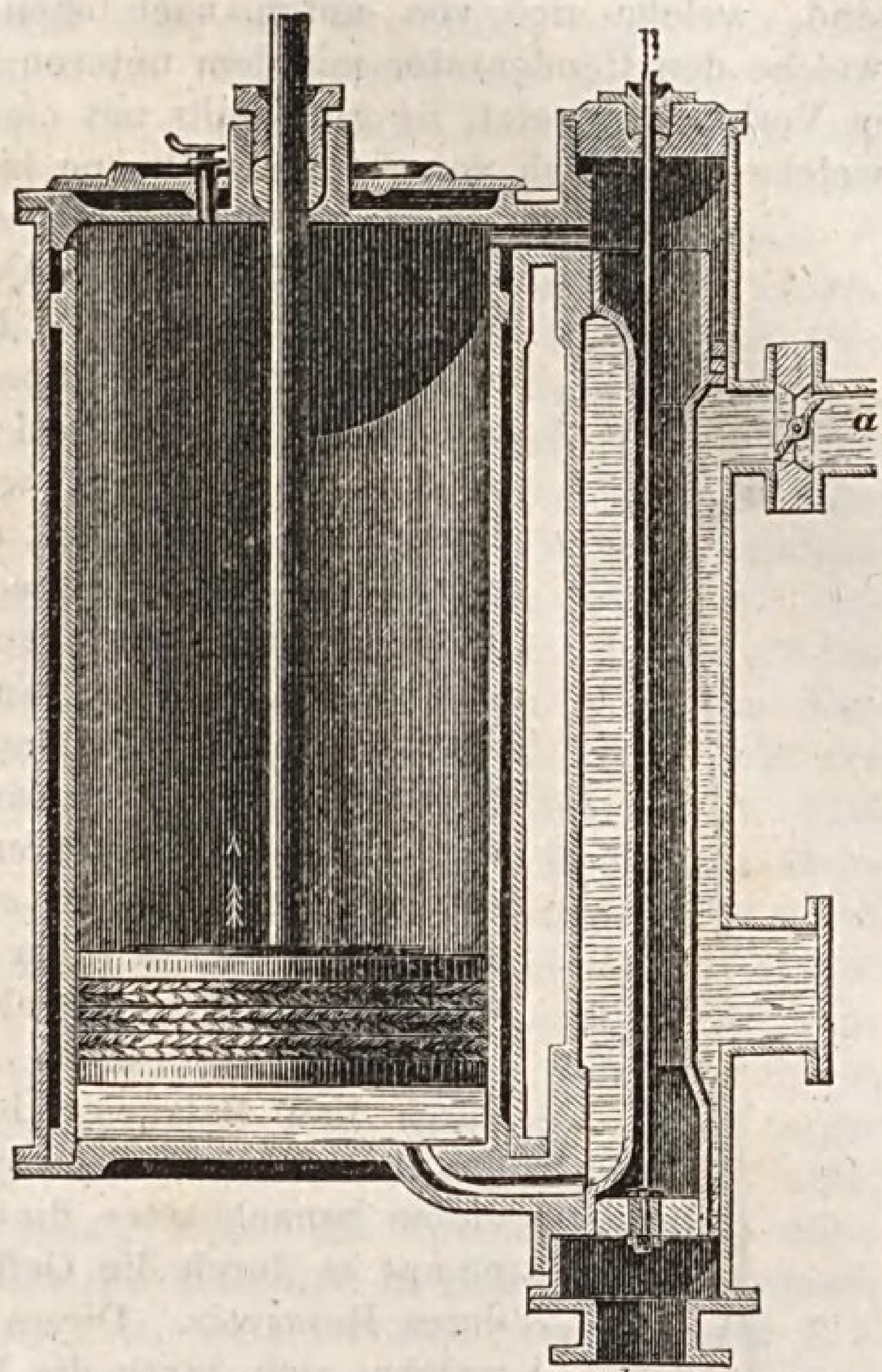


Fig. 601.

Eine Röhre *f* (Fig. 598) führt fortwährend einen Strahl kalten Wassers in den Condensator *e*. Diese Röhre ist mit einem Hahne *g* versehen, mittelst dessen man eine grössere oder geringere Verengung derselben hervorbringt, um den Wasserzufluss in den Condensator zu reguliren. Das warme Wasser, welches sich am Boden des Condensators ansammelt und welches theils von dem condensirten Dampf, theils von dem durch die Röhre *f* eingeführten Condensationswasser herrührt, wird fortwährend durch eine Luftpumpe herausgezogen. Diese Pumpe dient, wie ihr Name schon sagt, zu gleicher Zeit dazu, die im Condensator enthaltene Luft zu entfernen, wie wir das ausführlicher schon bei Gelegenheit der Cornwaller Maschine erklärt haben (§. 464). Der Kolben *h* der Luftpumpe ist durch eine lange Stange mit dem Punkte des *Watt*'schen Parallelogramms verbunden, welcher in der Fig. 596 (S. 921) mit F bezeichnet ist und welcher die Eigenschaft besitzt, sich ebenso wie der Punkt B sehr nahezu in einer geraden vertikalen Linie zu bewegen. Durch den Kolben *h* gehen zwei Oeffnungen, die mit Ventilen *i*, *i* versehen

sind, welche sich von unten nach oben öffnen. Die Röhre, welche den Condensator mit dem unteren Theile der Luftpumpe in Verbindung setzt, ist gleichfalls mit einem Ventil *k* versehen, welches sich nach der Seite der Pumpe hin öffnet.

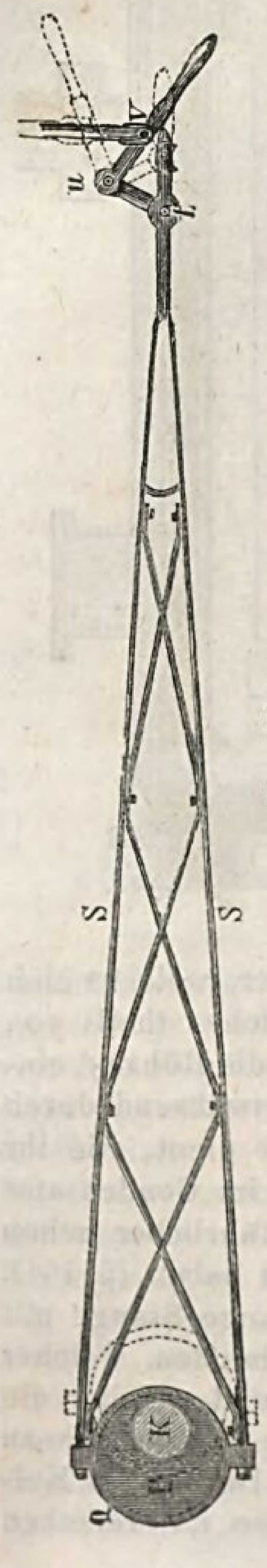


Fig. 602.

Das warme Wasser, welches die Luftpumpe fortwährend aus dem Condensator saugt, gelangt in einen Trog *l*. Ein Theil dieses Wassers wird von der Speisepumpe genommen, welche es in den Kessel drückt, um dasjenige wieder zu ersetzen, welches in Form von Dampf aus demselben entweicht. Der Kolben *m* der Speisepumpe wird ebenfalls durch den Balancier in Bewegung gesetzt. Wenn er sich erhebt, wird das Wasser aus dem Troge *l* durch die Röhre *n* aufgesaugt und dringt durch das Ventil *o*, das geöffnet ist; wenn der Kolben darauf wieder niedergeht, schliesst sich das Ventil *o*, das *o'* öffnet sich dagegen und das Wasser wird in die Röhre *p* gedrückt, welche es in den Kessel leitet.

Eine dritte Pumpe *q*, welche gleichfalls durch den Balancier bewegt wird, schöpft das kalte Wasser aus einem Brunnen oder aus einem benachbarten fliessenden Gewässer und pumpt es durch die Oeffnung *r* in ein besonderes Reservoir. Dieses kalte Wasser ist es, welches sich durch die Röhre *f* in den Condensator ergiesst und in denselben in Form eines Regens niederfällt, um den Dampf zu condensiren. Der Durchfluss des Wassers durch die Röhre *f* wird durch den Ueberschuss des Druckes der atmosphärischen Luft, welche frei auf den Spiegel der Flüssigkeit im Reservoir wirkt, über den Druck, der im Condensator stattfindet, hervorgebracht.

Die hin- und hergehende Bewegung, welche der Schieber annehmen muss, um den Dampf bald auf die obere, bald auf die untere Seite des Kolbens wirken zu lassen, wird ihm durch die Maschine selbst ertheilt. Zu diesem Zwecke trägt die Schwungradwelle K ein Stück P (Fig. 602), dessen Umfang ein Kreis ist, der

jedoch seinen Mittelpunkt ausserhalb der Achse liegen hat, um welche sich die Welle K dreht. Dieses Stück wird mit dem Namen Excentrik bezeichnet. Es ist von einem Ring Q umgeben, innerhalb dessen es, indem es sich dreht, gleiten kann. Während der Bewegung der Welle K wird der Theil der Excentrik P, welcher am meisten über die Welle vorsteht, bald nach rechts, bald nach links geführt. Da sich der Ring Q, der mit den Stangen S, S verbunden ist, nicht mit der Excentrik drehen kann, so wird er durch dieselbe blos einmal nach rechts, einmal nach links geschoben, und daraus folgt also eine hin- und hergehende Bewegung der Stangen S, S. Diese Stangen vereinigen sich an ihren, dem Ringe Q entgegengesetzten Enden mit einander und besitzen dort einen Einschnitt, mittelst dessen sie den Zapfen t eines Winkelhebels tuv ergreifen. In Folge der hin- und hergehenden Bewegung der Stangen S, S dreht sich der Hebel tuv um seinen festen Punkt u bald in dem einen, bald in dem anderen Sinn; diese seine oscillirende Bewegung überträgt sich auf einen vertikalen Stab, welcher einerseits in v mit dem Winkelhebel, andererseits mit der Schieberstange in Gelenken verbunden ist. Man sieht also, dass die Maschine, einmal in Bewegung gesetzt, diese Bewegung von selbst forterhält, weil sie mittelst der Excentrik P, wenn diese nur richtig angebracht ist, selbst immer den Schieber in die Stellung führt, welche er einnehmen muss, damit der Dampf fortfährt, seine Wirkung auszuüben. Um die Maschine in Bewegung zu setzen, hebt man den Handgriff, in welchen sich die Stangen S, S endigen, in die Höhe, damit sich der Hebel tuv frei drehen kann; hierauf ergreift man die Handhabe, in welche sich der Arm uv endigt, und bewegt den Hebel so, dass dadurch dem Schieber nach und nach die Stellungen gegeben werden, welche er annehmen muss, damit der Dampf abwechselnd auf die beiden Seiten des Kolbens wirken kann. Sobald die Maschine in Gang ist, stellt man die Verbindung der Stangen S, S mit dem Hebel tuv wieder her und die Bewegung setzt sich nun von selbst weiter fort.

Man sieht in Fig. 598 einen Riemen ohne Ende xx, mittelst dessen die Rotationsbewegung der Welle K auf eine vertikale Welle y übertragen wird. Diese Welle trägt einen Centrifugalregulator, einen Apparat, dessen Princip und Wirkungsweise wir bereits oben (§. 174) kennen gelernt haben. Dieser Regulator ist so eingerichtet, dass er von selbst auf die Maschine wirkt, um die Grösse der bewegenden Kraft zu vermindern oder zu vermehren, je nachdem die Geschwindigkeit zu schnell oder zu

langsam wird. Zu diesem Zweck besitzt die Hülse, welche die untere Spitze des in Gelenken beweglichen Parallelogrammes bildet, an ihrem Umfange eine kreisrunde Rinne, ähnlich dem Halse einer Rolle. Ein Hebel *z*, welcher an dem einen seiner Enden an einer horizontalen Achse befestigt ist, endigt sich am anderen Ende in eine Gabel, deren beide Arme sich in die Rinne legen, von der wir eben gesprochen haben. Diese Gabel *z* stört die Rotationsbewegung der Hülse des Regulators, welche sich frei zwischen den Armen der Gabel drehen kann, in keiner Weise. Aber wenn die Rotationsbewegung sich beschleunigt, so entfernen sich die Kugeln des Regulators von einander, die Hülse steigt und die Gabel des Hebels *z* wird gehoben; diese Gabel senkt sich dagegen, wenn sich die Bewegung der Maschine verzögert. Man sieht daraus, dass der Hebel *z* die horizontale Achse, an welcher er befestigt ist, in dem einen oder anderen Sinn dreht, je nachdem die Maschine schneller oder langsamer geht. Diese Bewegung setzt sich durch eine Reihe von Stangen und Hebeln, deren Anordnung man sich leicht denken kann, bis zur Achse eines Drosselventils fort, das in der Röhre angebracht ist, welche den Dampf aus dem Kessel in die Dampfkammer führt, wie man es in Figur 598, 600 und 601 sieht. In Folge dessen stellt sich dieses Ventil so, dass es den Durchweg des Dampfes in dem Maasse verengt, als die Bewegung der Maschine schneller wird, während es, wenn dieselbe zu langsam geht, dem Dampf einen weiteren Durchgang als gewöhnlich gestattet.

Die doppelt wirkende Dampfmaschine hat seit *Watt* verschiedene Modificationen erfahren, die theils eine vortheilhaftere Wirkungsweise des Dampfes, theils eine grössere Einfachheit in der Construction, theils eine passendere Anordnung unter dem Gesichtspunkt des Raumes, den die Maschine einnehmen soll, u. s. w. zum Zwecke haben. Wir wollen nicht auf alle diese Aenderungen näher eingehen, da sie uns zu weit führen würden; wir begnügen uns damit, die wichtigsten derselben kennen zu lernen.

§. 469. **Metallkolben.** — Bei der ersten Dampfmaschine benützte man solche Kolben, die wie diejenigen bei den Pumpen mit einer Liderung von Hanf an ihrem Umfange versehen waren. Die Elasticität dieser Liderung gestattete dem Kolben, sich in allen Theilen seines Umfanges genau an die innere Fläche des Cylinders anzulegen, trotz der Unvollkommenheiten, welche diese Fläche darbieten konnte. Aber diese Liderung musste häufig neu angezogen (vgl. §. 406) oder auch ganz erneuert werden, da sie sich rasch abnützte. Die seit dieser Zeit erreichte Vervollkommnung

in den Metallarbeiten machte es möglich, die Hanfliderung vollständig aufzugeben und Kolben, ganz von Metall, anzuwenden. In der That kann man jetzt die innere Fläche eines Cylinders mit solcher Genauigkeit ausbohren, dass alle Ungleichheiten, welche dieselbe noch besitzen kann, vollständig verschwinden und ein Kolben mit gut kreisförmigen Umfang ringsum mit aller Genauigkeit an ihr anliegen kann. Es ist indessen nothwendig, dem Umfange des Kolbens eine gewisse Elasticität zu lassen, da es ausserdem schwer wäre, einen genauen Anschluss zwischen ihm und dem Cylinder herzustellen, ohne dass eine sehr grosse Reibung und selbst ein gegenseitiges Angreifen ihrer Oberflächen daraus folgen würde. Desshalb richtet man die Kolben so ein, wie man dies an zwei Beispielen in den Figuren 603 bis 606 sieht. Jeder dieser Kolben wird so zu sagen aus zwei Lagen Metallsektoren

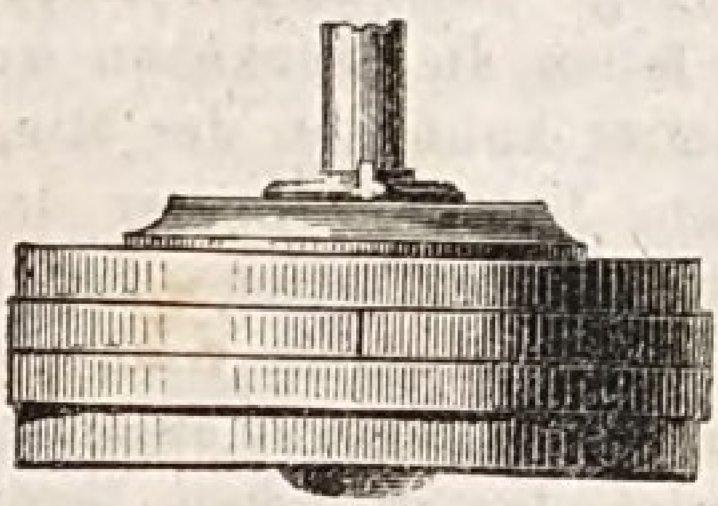


Fig. 603.

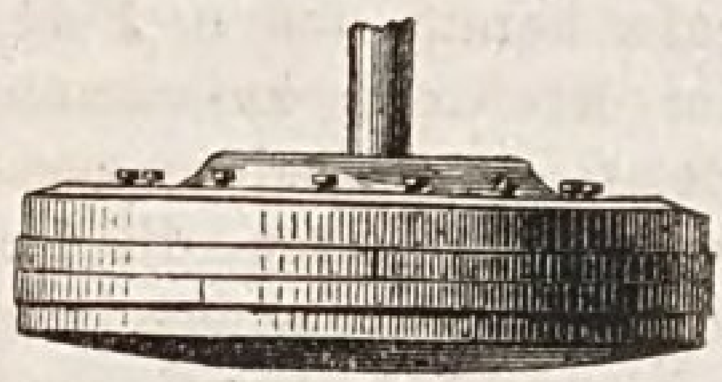


Fig. 605.

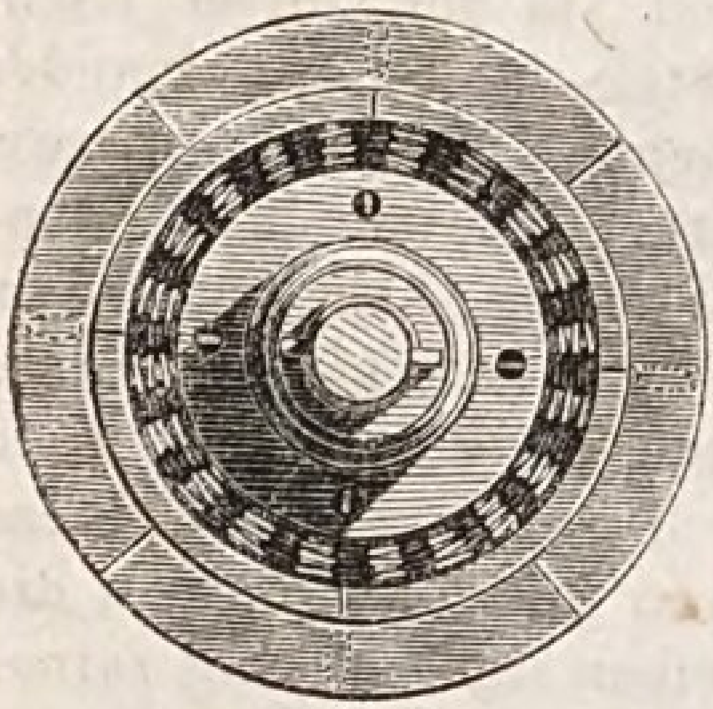


Fig. 604.

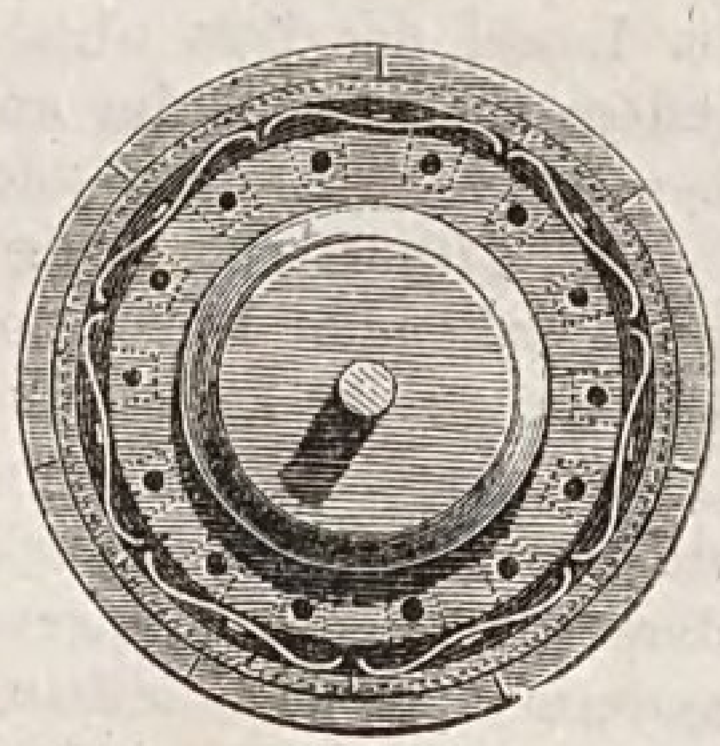


Fig. 606.

gebildet, die zwei übereinander gelegene Ringe bilden. Diese Ringe sind zwischen zwei kreisrunden Metallscheiben von etwas kleinerem Durchmesser enthalten, ohne jedoch so stark von denselben geklemmt zu werden, dass die Stücke, aus denen sie bestehen, nicht noch zwischen diesen Scheiben gleiten und sich dadurch der Achse des Kolbens mehr nähern oder von derselben entfernen könnten. Federn, welche im Innern des Cylinders angebracht sind, suchen die Metallsektoren fortwährend nach aussen

zu drücken; in Folge dessen legen sich dieselben genau an die Oberfläche des Cylinders an, können aber, indem sie sich der Achse mehr nähern, doch nachgeben, wenn besondere Umstände sie dazu nöthigen. Die Federn des Kolbens, der in Figg. 603 und 604 dargestellt ist, sind Spiralfedern und in grosser Anzahl vorhanden; diejenigen des anderen Kolbens (Figg. 605 u. 606) sind einfache federnde Blechstreifen, die in ihrer Mitte befestigt sind und mit ihren Enden auf die Metallsektoren wirken.

In neuester Zeit wendet man als Kolbenliderung einfache Ringe von Guss- manchmal auch von Schmiedeisen an. Dieselben haben ursprünglich nicht die Kreis- sondern eine elliptische Form und werden an einer ihrer flachen Seiten aufgeschnitten so, wie es Fig. 607 zeigt. Dabei fallen die Stückchen *aa* ganz heraus und in Folge seiner Elasticität kann nun der Ring zur Kreisform zusammengebogen werden, hat aber immer das Bestreben, wieder auseinander zu gehen. Zwei solche Ringe werden in Nuten, die rings um den Kolben eingedreht sind, gelegt und zwar so, dass ihre aufgeschnittenen Stellen gegen einander versetzt sind. Durch ihr Bestreben, auseinander zu gehen, legen sich die Ringe dicht an die Cylinderwände an, und wenn sie sich im Laufe der Zeit abschleifen, so gehen sie von selber nach, indem sie sich bei der aufgeschnittenen Stelle weiter aus einander begeben. Man nennt solche Kolben manchmal Selbstspanner.

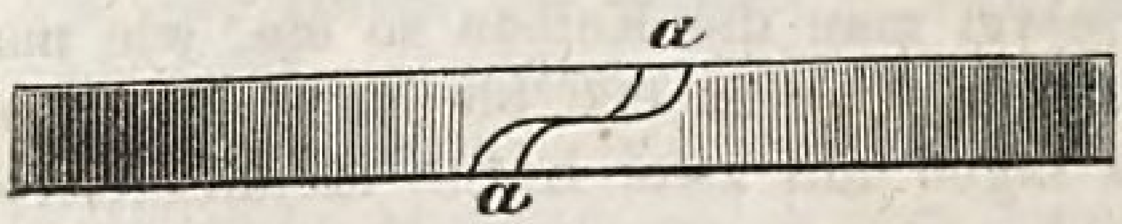


Fig. 607.

§. 470. **Bewegung des Schiebers.** — Damit in der doppelt wirkenden Maschine der Dampf bald über, bald unter dem Kolben wirken kann, muss der Schieber zwei verschiedene Stellungen annehmen. In jeder dieser Stellungen sollte er unbeweglich stehen bleiben, so lange der Sinn der Bewegung des Kolbens derselbe bliebe, während er schnell von einer Stellung in die andere übergehen müsste, sobald der Kolben die Richtung seiner Bewegung wechselt. Die Excentrik, welche wir bei der *Watt*'schen Maschine beschrieben haben und welche dazu bestimmt ist, den Schieber zu bewegen, ist weit davon entfernt, den eben angegebenen Bedingungen zu genügen. Der Schieber erhält von derselben eine continuirliche Bewegung bald in dem einen, bald in dem anderen Sinn. Daher kommt es, dass die Oeffnungen, durch welche der Dampf aus der Dampfkammer oben oder unten in den Cylinder tritt, sich nur allmählich öffnen und schliessen; sie sind folglich während eines Theiles des Kolben-

hubes verengt, was einen Verlust an Arbeit hervorbringt. Ebenso wird die Verbindung zwischen einem der beiden Theile des Cylinders und dem Condensator nur nach und nach hergestellt; daraus folgt, dass am Anfang der Dampf, welcher in den Condensator abströmen soll, bei seinem Austritt aus dem Cylinder einen gewissen Widerstand findet und in Folge dessen einen Gegendruck auf die Fläche des Kolbens ausübt, mit welcher er in Berührung ist.

Man kann aber diese Nachtheile grösstentheils dadurch vermeiden, dass man den Oeffnungen, welche der Schieber nach und nach mit der Dampfkammer und mit dem Condensator in Verbindung setzen soll, eine grössere Höhe und dafür geringere Breite gibt und den Weg des Schiebers etwas grösser macht als es, streng genommen, nothwendig wäre, um den Wechsel in den Verbindungen hervorzubringen. Auf diese Weise brauchen die Ränder des Schiebers einen geringeren Theil der ganzen Dauer seines Weges, um über jede der Oeffnungen hinwegzugehen, und diese letzteren werden daher nur während kürzerer Zeitintervalle verengt.

Damit der Dampf möglichst gleichmässig und die Maschine möglichst vortheilhaft wirke, ist es nöthig, dass der Schieber die betreffende Oeffnung schon zu eröffnen anfängt, wenn der Treibkolben noch nicht ganz seinen Weg zurückgelegt hat, weil dann sogleich beim Anfang des entgegengesetzten Kolbenlaufes der neueinströmende Dampf mit aller Stärke wirken kann. Aus dem entgegengesetzten Grunde ist es ebenso auch vortheilhaft, dass der Schieber schon vor dem Ende des Treibkolbenweges den Dampfzutritt aufhebe und den Dampfabführungsweg öffne. Man bringt dieses zeitigere Eröffnen und Schliessen der Oeffnungen durch eine Verdrehung des Excenters nach vorwärts zu (V o r e i l u n g) hervor und nennt es das Voreilen des Schiebers. Nach den Erfahrungen, welche man mit dem Indicator (s. unten §. 482) gemacht hat, ist besonders das zeitigere Eröffnen der Ausströmungskanäle von Vortheil. Dieselben sollen mindestens $^1/_3$ ihrer Breite offen sein, wenn der Kolben am todten Punkt steht. Bei der Einströmung reicht ein Voreilen von $^1/_8$ bis $^1/_{10}$ der Kanalbreite aus.

§. 471. **Verschiedene Expansionsarten.** — Man hat verschiedene Einrichtungen erdacht, um den Dampf in den doppelt wirkenden Maschinen mit Expansion (s. §. 463) wirken zu lassen. So hat man namentlich auch zwei Schieber zugleich angewandt, einen sog. Steuerungs- und einen Expansionsschieber, die sich entweder unmittelbar übereinander oder in zwei getrennten Dampf-

kammern bewegen; im ersten Fall ist der Steuerungsschieber, d. h. derjenige, welcher unmittelbar die Dampfwege in den Cylinder öffnet und schliesst, selbst von zwei Dampfwegen durchdrungen, während der Expansionsschieber, gewöhnlich blos eine Platte, voll ist und zu passenden Zeiten diese Dampfwege des Steuerungsschiebers öffnet und schliesst; im zweiten Fall gelangt der Dampf zuerst in die Dampfkammer, in welcher sich der Expansionsschieber bewegt, und von dieser durch eine Oeffnung, die von jenem Schieber in passenden Zeiten geöffnet und geschlossen wird, in die andere. Wir wollen nicht näher auf diese Einrichtungen eingehen, sondern uns begnügen hier nur zwei Expansionsarten näher anzugeben, die eine weite Verbreitung gefunden haben.

Die Clapeyron'sche Expansion besteht aus einem gewöhnlichen Schieber, der durch eine Kreis-Excentrik bewegt wird. In Folge dieser ihrer grossen Einfachheit eignet sie sich besonders für Maschinen, deren Bewegungen sehr schnell sind, wie z. B. für Lokomotiven, von denen wir bald mehr reden werden. Der Schieber A (Fig. 608) bewegt sich wie gewöhnlich an einer ebenen Fläche, in welcher sich die beiden Dampfwege B, C, die zu den Enden

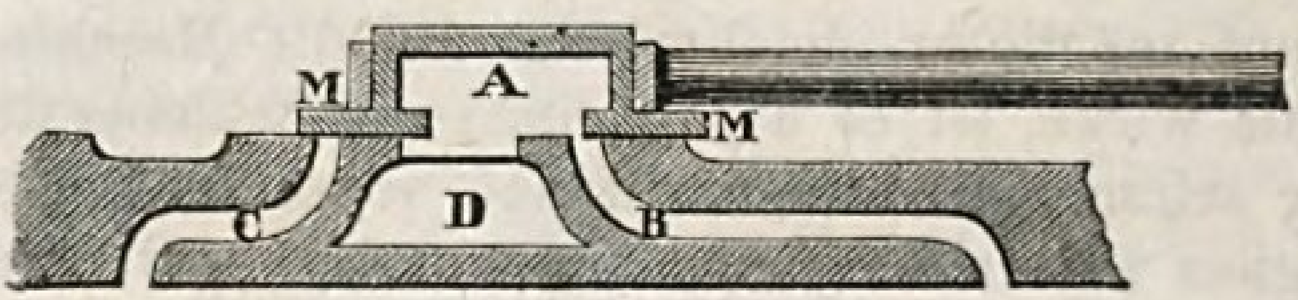


Fig. 608.

des Cylinders führen, sowie auch der Kanal D, durch welchen der Dampf in den Condensator oder in die freie Luft abströmt, endigen. Aber die Ränder des Schiebers sind mit zwei Stücken MM versehen, deren Breite viel grösser als diejenige der Oeffnungen B,C ist. Aus dieser einzigen Aenderung an dem Schieber folgt, dass wenn eine der Oeffnungen B, C aufhört, in Verbindung mit der Dampfkammer zu sein, sie während einiger Zeit geschlossen bleibt, bevor die Communication mit dem Kanal D durch das Innere des Schiebers hergestellt wird. Wenn man das Excentrik so einrichtet, dass jede dieser Oeffnungen B, C durch die verbreiterten Ränder M, M des Schiebers hinreichend lange Zeit geschlossen bleibt, so begreift man leicht, dass man es dahin bringen kann, dass der Dampf anfangs, während eines Theils des Kolbenweges, mit vollem Druck wirkt und hierauf, während des übrigen Theils dieses Weges, mit Expansion.

Ganz verschieden von den bisher beschriebenen ist die *Meyer*'sche Expansion (Figg. 609 u. 610). Es wird hier die Oeffnung a, durch

welche der bei A aus dem Kessel kommende Dampf in die Dampfkammer tritt, durch ein kegelförmiges Ventil K verschlossen, zu welchem Zwecke diese Oeffnung konisch ausgenommen ist. Die Vertheilung des in die Dampfkammer gelangten Dampfes erfolgt durch den Steuerungsschieber S ganz so wie in den schon oben beschriebenen Steuerungssystemen. So lange die Oeffnung a offen ist, wirkt der Dampf mit vollem Druck, wenn sie aber durch das Ventil K verschlossen wird, so kann der Dampf nur noch mit

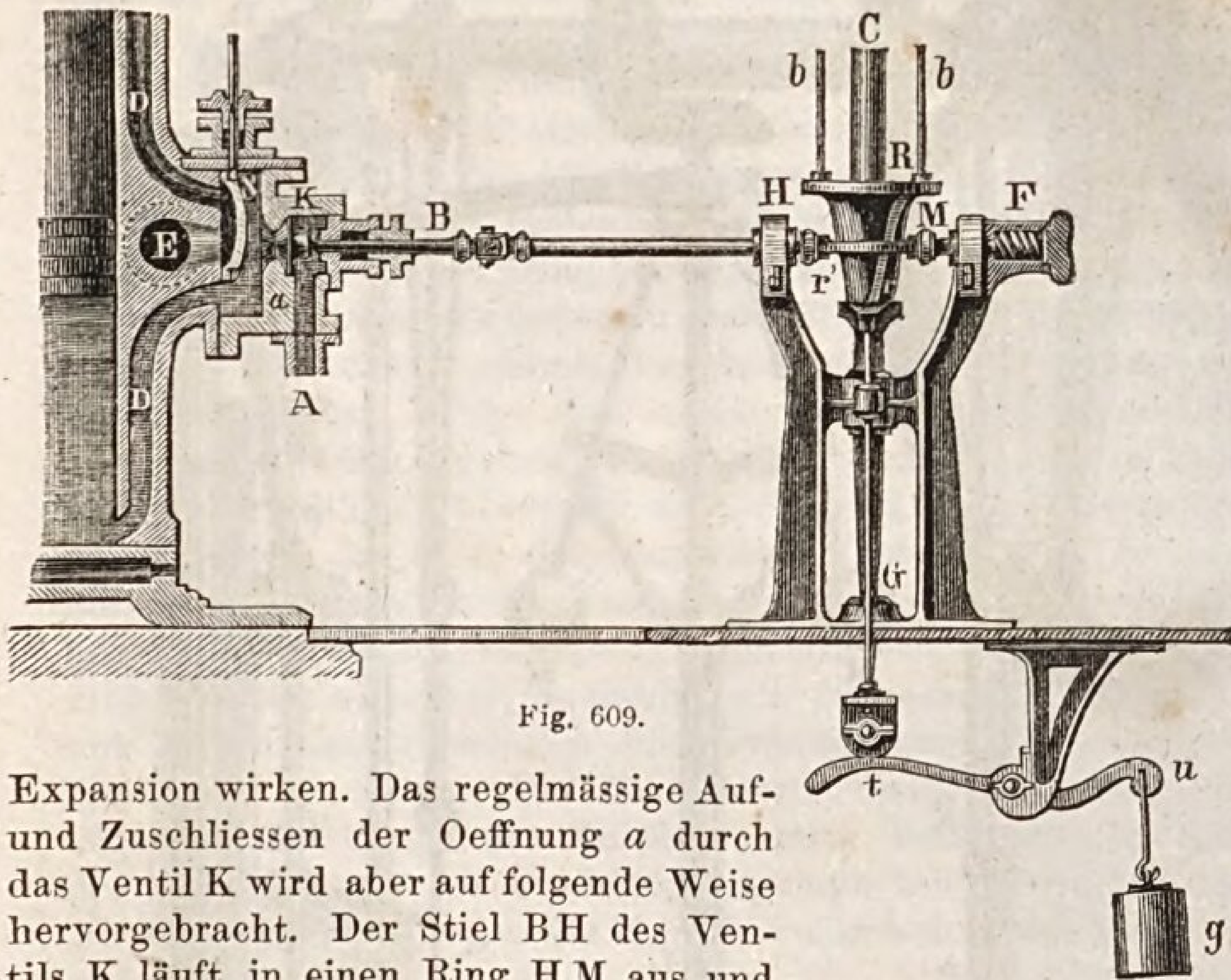


Fig. 609.

Expansion wirken. Das regelmässige Auf- und Zuschliessen der Oeffnung a durch das Ventil K wird aber auf folgende Weise hervorgebracht. Der Stiel BH des Ventils K läuft in einen Ring HM aus und stemmt sich gegen eine Spiralfeder F. Der Ring HM umfasst eine mit zwei Längenrippen versehene kegelförmige Hülse R, die mittelst einer Spindel CG durch die Maschine in stetiger Umdrehung erhalten wird. Die Feder F schiebt den Ring in der Richtung MH und dadurch das Ventil K in die Oeffnung a; die konische Hülse R hingegen bewegt mittelst ihrer etwas spiralförmig zulaufenden Rippen r

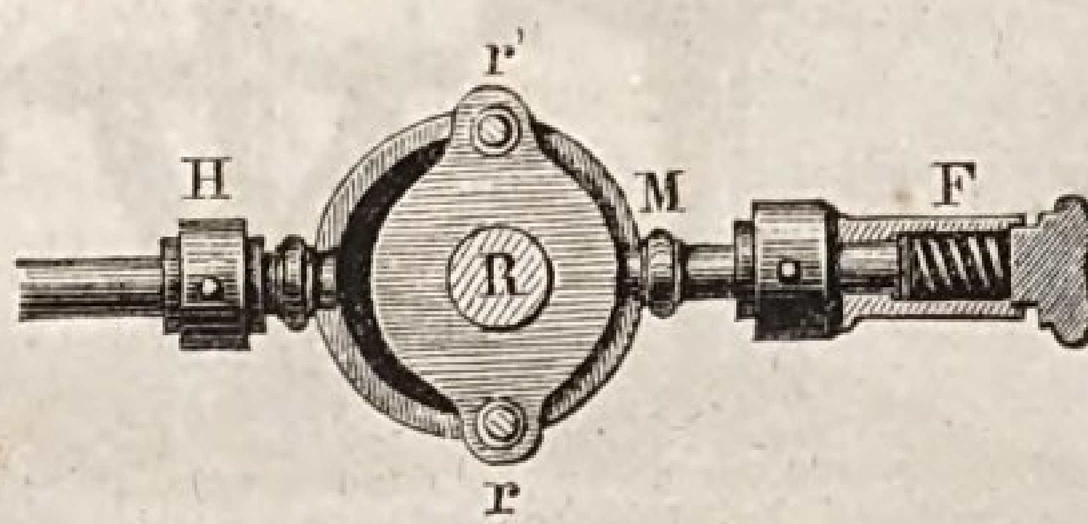


Fig. 610.

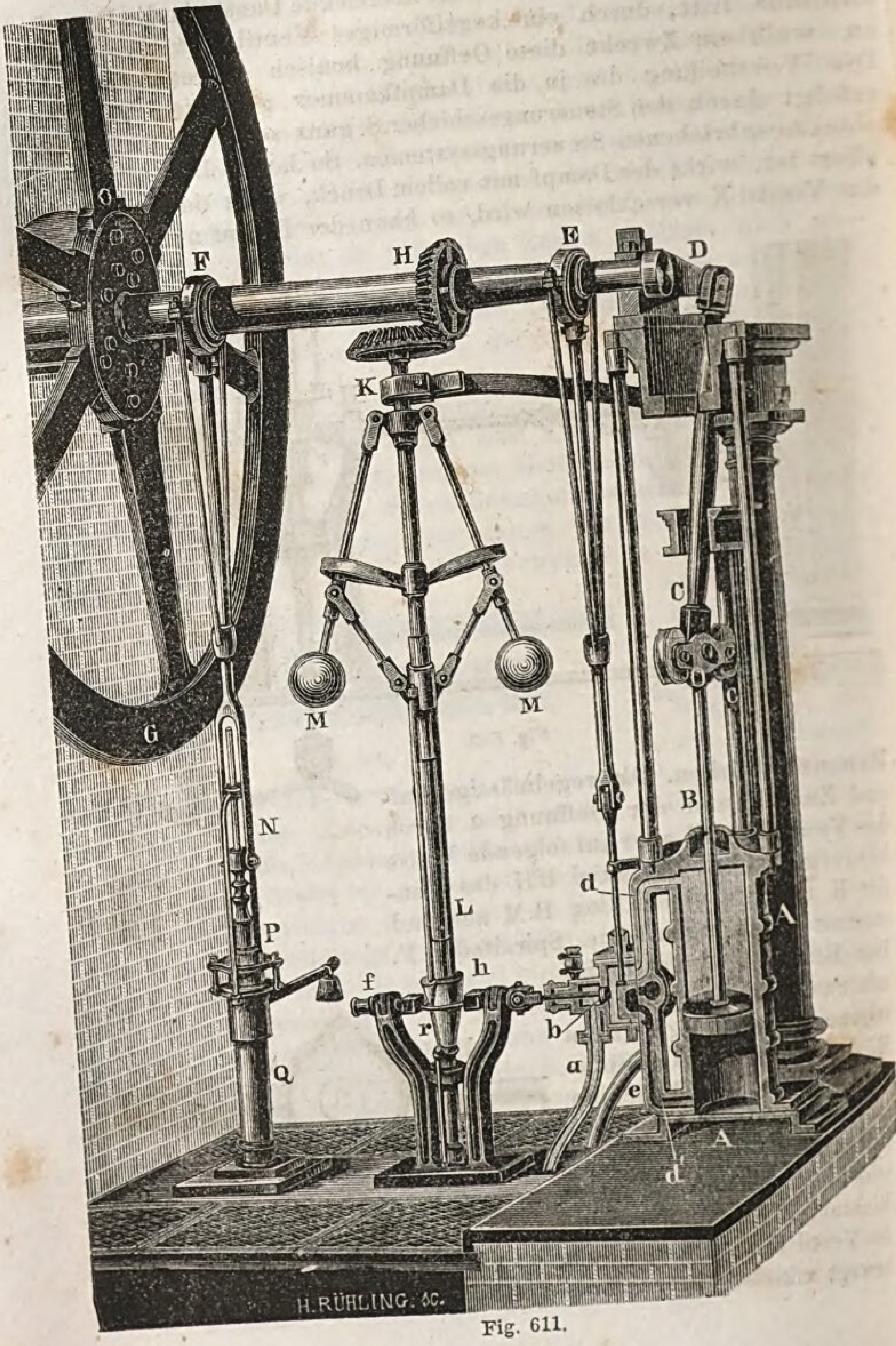


Fig. 611.

und r' den Ring in der entgegengesetzten Richtung H M und zieht hiebei das Ventil aus der Oeffnung a zurück. Im letzteren Fall findet Dampfzufluss, in ersterem Dampfabsperrung und daher Expansion des Dampfes statt. Macht die Spindel C G und also auch die Hülse R mit der Kurbelwelle in einerlei Zeit gleichviel Umdrehungen, so wird, wie richtig, mittelst der Rippen r und r' bei jedem Spiele zweimal, und also für jeden Auf- und Niedergang des Kolbens einmal, frischer Dampf zugelassen. Wenn man die Hülse R höher hebt, so bringt man eine schwächere Stelle der Rippen r und r' in die Ebene des Rings und es wird dadurch die Zeit der Eröffnung von a eine kleinere; wenn man umgekehrt die Hülse R tiefer stellt, so kommen die stärkeren Stellen von r und r' in die Ringebene und es wird dann bei Umdrehung von R die Oeffnung a längere Zeit offen gehalten, wodurch ein grösserer Dampfzufluss stattfinden kann. Um aber dieses Heben oder Niederlassen der Hülse, dem Bedürfniss an Dampf entsprechend, durch die Maschine selbst hervorbringen lassen zu können, bringt man an der vertikalen Welle C G weiter oben einen Centrifugalregulator an, dessen bewegliche Hülse mittelst der Stäbe b, b mit der konischen Hülse R in Verbindung steht. Wenn der Gang der Maschine zu schnell wird, so gehen die Kugeln des Centrifugalregulators weiter aus einander und heben dessen Hülse; mit dieser zugleich hebt sich die konische Hülse R und veranlasst dadurch nach Obigem eine Vergrösserung der Expansion und also eine Verminderung der bewegenden Kraft der Maschine. Das Umgekehrte findet bei einer Verzögerung des Gangs der Maschine statt. Damit die Bewegung der Hülse R durch den Centrifugalregulator leicht erfolgen kann, wird jene Hülse mittelst des Hebels tu durch das Gegengewicht g getragen.

Die Figur 611 zeigt die wesentliche Einrichtung der Dampfmaschine (Hochdruckmaschine), die mit der *Meyer*'schen veränderlichen Expansion versehen ist. A ist der Cylinder, d und d' sind die Dampfwege; durch die Röhre a wird der Dampf aus dem Kessel in die Dampfkammer geleitet; e führt den ausgedienten Dampf ab. Die Kolbenstange B wird zwischen den Säulen c an den Frictionsrollen O geführt und bewegt die Bleuelstange C, die mittelst der Kurbel D die Welle des Schwungrads G dreht. Die Excentrik E bewegt die Stange des Dampfschiebers. Durch die konischen Räder H K wird die Welle K L des Centrifugalregulators mit den Schwungkugeln M, M in Rotation versetzt; an dieser Welle sitzt der gerippte Konus h der

Meyer'schen Expansion. Die Excentrik F bewegt die Stange N des Kolbens P der Speisepumpe, deren Stiefel Q ist.

§. 472. **Die Woolf'sche Dampfmaschine mit zwei Cylindern.** — Manchmal bringt man zwei Cylinder von gleicher Höhe aber verschiedenen Durchmessern neben einander an, bei welchen der Dampf von einem in den anderen übergeht. Diese Einrichtung, von *Woolf* erfunden, hat ebenfalls den Zweck den Dampf mit Expansion wirken zu lassen. Die beiden Kolben A, B (Fig. 612) sind an den oberen Enden ihrer Stangen mit einander

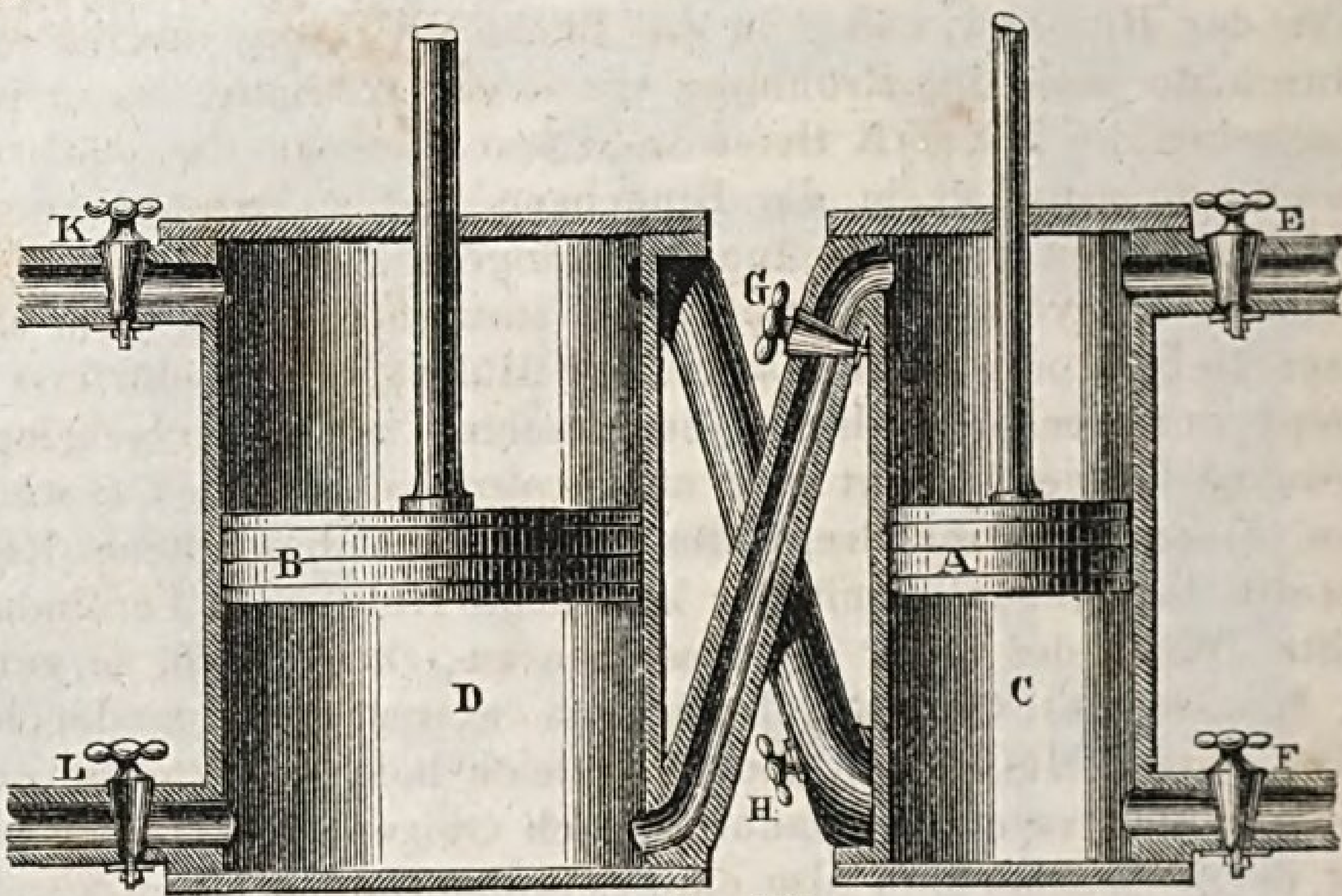


Fig. 612.

verbunden, sodass sie sich zusammen bewegen müssen und sich in ihren betreffenden Cylindern C, D immer in gleicher Höhe befinden. Die Hähne E, F gestatten dem Dampf des Kessels über sowohl, als auch unter dem Kolben A in den kleinen Cylinder C einzutreten; die Hähne G, H sind in Röhren angebracht, mittelst welchen man sowohl den oberen Theil des Cylinders C mit dem unteren Theil des Cylinders D, als auch den unteren Theil des Cylinders C mit dem oberen Theil des Cylinders D in Verbindung setzen kann; durch die Hähne K, L endlich kann der Dampf aus dem zweiten Cylinder in den Condensator strömen. Wenn die Hähne E, H, L geöffnet, die anderen aber geschlossen sind, so drückt der Dampf aus dem Kessel den Kolben A von oben nach unten. Der Dampf, welcher schon vorher unter diesem Kolben eingeführt worden war und theilweise bereits in den oberen Theil des Cylinders D übergegangen ist, drückt auf den Kolben A von unten nach oben und zu gleicher Zeit auf den

Kolben B von oben nach unten; aber dieser zweite Druck überwiegt den ersten, weil der Kolben B grösser als der andere ist; der Unterschied dieser beiden Drückungen addirt sich zu dem Drucke, welchen der Kolben A auf seiner oberen Fläche erfährt, und bildet so die Gesammtkraft, welche die beiden vereinigten Kolben abwärts zu treiben sucht. Unter der Wirkung dieser Kraft gehen die beiden Kolben nieder. Unten angelangt, schliessen sich die Hähne E, H, L, während sich die anderen öffnen; der Dampf strömt aus dem Kessel in den unteren Theil des Cylinders C; derjenige, welcher sich in dem oberen Theil dieses Cylinders befindet, geht in den unteren Theil des Cylinders D und derjenige in dem oberen Theil des Cylinders D entweicht in den Condensator. Die Kolben erheben sich folglich unter der Wirkung einer Kraft, gleich derjenigen, welche sie abwärts gehen machte u. s. f. Die verschiedenen Hähne wurden hier übrigens nur der leichteren Erklärung halber angenommen; in Wahrheit wendet man zur Steuerung Schieber an, welche dieselben Zwecke zu erfüllen haben.

Während des Niederganges der beiden Kolben nimmt der Dampf in dem unteren Theil des Cylinders C und in dem oberen Theil des Cylinders D allmählich einen immer grösseren Raum ein, er wirkt also durch Expansion; das Gleiche findet beim Aufgang der beiden Kolben statt. Die Gesammtkraft, welche die beiden Kolben auf- oder abwärts steigen macht, ist grösser, als wenn der Cylinder C allein vorhanden wäre und der Dampf, nachdem er in diesem Cylinder gewirkt hat, unmittelbar in den Condensator überginge; und doch ist die Menge des verbrauchten Dampfes in dem ersten Fall nicht grösser, als sie in dem zweiten sein würde. Man sieht also, dass die Anwendung eines zweiten Cylinders von bedeutendem Vortheil begleitet ist. Dieselbe Menge Dampf erzeugt eine grössere Menge Arbeit. Dies kommt davon her, dass sich der Dampf, indem er von dem Cylinder C in den D übergeht, ausdehnt und erst dann in den Condensator abströmt, nachdem man die aus seiner Ausdehnung entspringende Arbeit nutzbar gemacht hat.

In Wirklichkeit sind die *Woolf*'schen Maschinen nicht so eingerichtet, wie es die Fig. 612 zeigt, die nur zur Verdeutlichung des Vorgangs dienen sollte. Das Eröffnen und Schliessen der Kanäle und Verbindungswege geschieht, wie schon gesagt, auch hier meistens mittelst Schieber.

§. 473. **Veränderliche Expansion.** — Wir haben oben das von *Watt* angewandte Mittel angegeben, die Wirkung des Dampfes in dem Cylinder zu ändern, je nachdem sich die Be-

wegung der Maschine beschleunigt oder verzögert, sodass auf diese Weise die Geschwindigkeit ihres Ganges in gewissen Grenzen erhalten bleibt. Dieses Mittel, welches aus einem Drosselventil besteht, das dazu bestimmt ist den Durchgang des Dampfes mehr oder weniger zu verengen (§. 468), hat den Nachtheil, dass es durch die Art und Weise selbst, in welcher es wirkt, einen Verlust an Arbeit nach sich zieht (§. 375); desshalb hat man gesucht, es durch ein anderes vortheilhafteres zu ersetzen. Man gelangt zu einem solchen, indem man den Apparat, der zur Vertheilung des Dampfes dient, so einrichtet, dass die Expansion nach Belieben in grösserem oder geringerem Grad hervorgebracht wird, d. h. dass der Dampf während eines kleineren oder grösseren Theils des Kolbenhubes mit vollem Drucke wirkt und sich hierauf ausdehnt. Man sieht in der That, dass wenn man bei jedem Kolbenhub die Verbindung des Kessels mit dem Cylinder kürzere Zeit hindurch bestehen lässt, so wird weniger Dampf verbraucht, und die Arbeit, welche durch die Wirkung des Dampfes auf den Kolben entwickelt wird, vermindert sich; wenn man im Gegentheil den Dampf während eines grösseren Theils des Kolbenhubes mit vollem Druck wirken lässt, so wird mehr Dampf verbraucht, und die von der Maschine geleistete Arbeit wird grösser. Man begreift also, dass man, indem man die Expansion ändert, die durch die Wirkung des Dampfes im Cylinder entwickelte Bewegungsarbeit fortwährend mit der Grösse der Widerstandsarbeit, welche an der Maschine angebracht ist, in's Verhältniss setzen und auf diese Weise ihre Geschwindigkeit in passenden Grenzen erhalten kann.

Ein Mittel, die Expansion in dieser Weise zu verändern, haben wir bereits bei der *Meyer*'schen Expansion (§. 471) kennen gelernt. Da, wo die Expansion durch Schieber hervorgebracht wird, ist die Einrichtung eine andere; wenn man blos einen Schieber anwendet (Fig. 608), so kann die Aenderung der Expansion dadurch bewirkt werden, dass man den Weg und das Voreilen desselben ändert, was durch Anwendung der *Stephenson*'schen Coulisse (s. unten §. 490) sehr einfach geschehen kann.

Bei zwei Schiebern, einem Steuerungs- und Expansionsschieber, kann derselbe Zweck erreicht werden, wenn man den Weg des letzteren veränderlich macht, um ihm die passende Grösse geben zu können. Näher können wir hier auf die Beschreibung der Stücke, durch welche die Expansion verändert wird, nicht eingehen; nur das wollen wir noch hinzufügen, dass diese Aenderung der Expansion bald dem Belieben des Maschinen-

wärters überlassen ist, bald, wie bei der *Meyer*'schen Expansion, durch die Maschine selbst mit Hilfe eines Centrifugalregulators besorgt wird.

§. 474. **Der Condensator.** — Die Anwendung eines Condensators ist nur dann unerlässlich, wenn man dem Dampf im Kessel eine nicht viel grössere Spannkraft als eine Atmosphäre gibt. Aber dem ist nicht mehr so, wenn der Dampf einen Druck besitzt, der bedeutend grösser ist als derjenige der äusseren atmosphärischen Luft. In diesem Falle reicht es in der That hin, abwechselnd jedes der beiden Enden des Cylinders in Verbindung mit der Atmosphäre zu setzen, während das andere Ende mit dem Kessel communicirt, um den Kolben durch den Unterschied der Drückungen, welche er auf seinen beiden Flächen erleidet, in Bewegung zu setzen. Desshalb ist die Anwendung des Condensators bei den Hochdruckmaschinen rein willkürlich. Man lässt ihn weg oder behält ihn bei, je nach den Umständen, welche gegeben sind. Wenn man eine grosse Menge Wasser, die zur Condensation des Dampfes dienen kann, leicht zur Verfügung hat, so condensirt man den Dampf, weil daraus in Bezug auf die Arbeit, die eine gewisse Quantität desselben erzeugt, immer ein Vortheil entspringt; der luftverdünnte Raum, welcher sich in dem Theil des Cylinders, gegen welchen sich der Kolben bewegt, bildet, hat eine Vermehrung der Bewegungsarbeit zur Folge, die durch die Widerstandsarbeit, welche die Luft- und Kaltwasserpumpe veranlassen, nicht vollständig compensirt wird. Wenn man sich im Gegentheil das zur Condensation nothwendige Wasser nur schwer verschaffen kann, oder wenn der Zweck, welchen die Maschine zu erfüllen hat, erfordert, dass dieselbe nur wenig Raum einnimmt, so lässt man den Condensator weg und mit ihm natürlich die Luft- und Kaltwasserpumpe. Man lässt dann den ausgedienten Dampf entweder unmittelbar in die freie Luft, oder benützt ihn wohl auch, indem man ihn durch geeignete Röhren leitet, zur Heizung der Fabriklocalitäten, zum Erhitzen und Kochen von Wasser, Farben etc.

§. 475. **Hochdruckmaschinen.** — Suchen wir uns nun Rechenschaft darüber zu geben, ob überhaupt und welche Vortheile die Anwendung des Dampfes mit hoher Spannung darbieten kann, und setzen wir zu diesem Zwecke zunächst voraus, dass derselbe ohne Expansion wirke. Wenn man dem Dampfe eine Spannkraft von 4 Atmosphären z. B. gibt, so ist nach der Tabelle auf Seite 900 seine Temperatur 144°; sie würde nur 100° sein, wenn seine Spannkraft blos 1 Atmosphäre betrüge.

Angenommen, dass man hier noch das *Mariotte*'sche und *Gay-Lussac*'sche Gesetz (§§. 305 u. 306) anwenden kann, so sieht man, dass ein Volumen 1 gesättigten Wasserdampfes von der Temperatur 144° ein Volumen 4 einnehmen wird, wenn man es, ohne seine Temperatur zu ändern, ausdehnt, bis seine Spannkraft gleich 1 Atmosphäre wird; und dass sich dieses Volumen auf 3,48 reducirt, wenn seine Temperatur auf 100° herabsinkt, ohne dass die Spannkraft aufhört, gleich 1 Atmosphäre zu sein. Wenn also zwei gleich grosse Mengen von Wasser in gesättigten Dampf verwandelt werden, die eine unter einem Drucke von 4 Atmosphären, die andere unter einem Drucke von 1 Atmosphäre, so nehmen sie Volumina ein, welche sich verhalten wie die Zahlen 1 und 3,58. Die Cylinder der beiden Maschinen, welche, während sie in Thätigkeit sind, bei jedem Kolbenhub gleiche Mengen von Dampf, die eine von 4 Atmosphären, die andere von 1 Atmosphäre, verbrauchen sollen, müssen also Rauminhalte haben, die denselben Zahlen 1 und 3,58 proportional sind; wenn daher die Kolben bei beiden Maschinen gleiche Wege durchlaufen, so müssen ihre Flächen in demselben Verhältniss wie diese beiden Zahlen stehen. Aber der Druck, welcher auf jeden Quadrat-Centimeter der Fläche des ersten Kolbens ausgeübt wird, ist viermal so gross als derjenige, welchen jeder Quadrat-Centimeter der Fläche des zweiten Kolbens zu tragen hat; die Gesammtdrückungen also, welche schliesslich der Dampf auf die beiden Kolben ausübt, verhalten sich wie die Zahl 4 und 3,58. Die Mengen der Arbeit, welche durch dieselbe Masse in Dampf verwandelten Wassers in beiden Maschinen entwickelt wird, verhalten sich also ebenfalls wie diese beiden Zahlen: d. h. es wird durch den Dampf, welcher mit 4 Atmosphären wirkt, etwas mehr Arbeit geleistet als durch den von 1 Atmosphäre. Aber zugleich sieht man aus der Tabelle auf Seite 901, dass, um eine gewisse Wassermasse in gesättigten Dampf von 4 Atmosphären Druck zu verwandeln, etwas mehr Wärme erfordert wird, als wenn der Dampf nur 1 Atmosphäre Spannung erhalten soll. Vom ökonomischen Standpunkte aus wird es also so ziemlich gleichgiltig sein, ob man den Dampf mit hohem oder mit niederem Drucke wirken lässt.

Nach diesem bieten also die Hochdruckmaschinen, in denen der Dampf nicht mit Expansion wirkt, keinen wesentlichen Vortheil als höchstens den, dass der Rückdruck, welchen der ausgediente Dampf, indem er aus dem Cylinder entweicht, um sich entweder in den Condensator oder in die freie Luft zu ergiessen, auf den Kolben ausübt, um so geringer ist, je kleiner die Kolben-

fläche gemacht wird; auch ist noch das in Betracht zu ziehen, dass der Cylinder der Hochdruckmaschinen weniger Platz einnimmt als derjenige einer gleich starken Niederdruckmaschine.

In dem Falle jedoch, wo man den Dampf mit Expansion arbeiten lässt, wie dies gegenwärtig immer geschieht, haben die Hochdruckmaschinen einen sehr bedeutenden Vortheil vor den Niederdruckmaschinen voraus, der darin besteht, dass bei ersteren ein weit höherer Grad von Expansion angewendet werden kann als bei letzteren.

Bei den meisten Dampfmaschinen, welche jetzt gebaut werden, wird der Dampf mit einer Spannkraft von 4, 5 und selbst 6 Atmosphären angewendet. Am vortheilhaftesten hat man es gefunden, sich neben so hoher Spannungen auch noch des Condensators zu bedienen.

§. 476. **Uebertragung der Bewegung des Kolbens auf eine rotirende Welle.** — Bei der *Watt*'schen Maschine wird die hin- und hergehende Bewegung des Kolbens mittelst eines Balanciers, einer Bleuelstange und einer Kurbel auf eine rotirende Welle übertragen. Häufig lässt man den Balancier auch weg und vereinigt direkt das Ende der Kolbenstange mit der Bleuelstange (Fig. 613). In diesem Falle muss die Stange A bei ihrer Bewegung geführt werden, damit sie nicht durch den schiefen Wider-

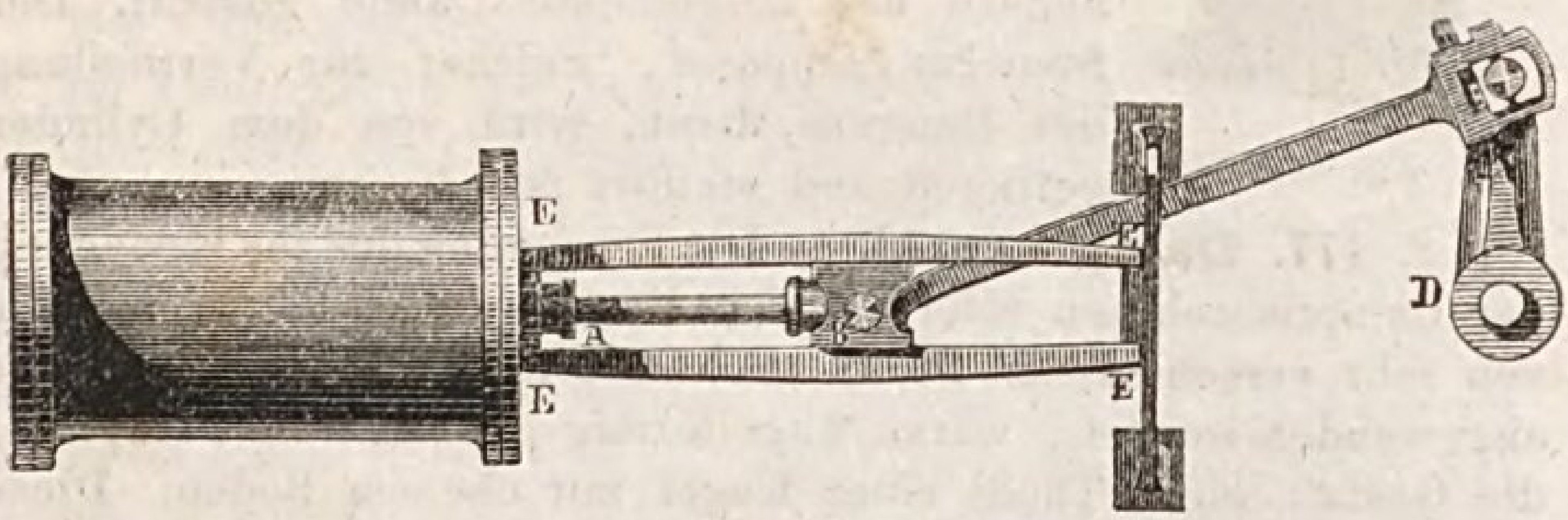


Fig. 613.

stand, welchen sie von Seite der Bleuelstange erfährt und welcher seine Richtung in dem Maasse ändert, als sich die Kurbel um die Welle dreht, hin- und hergebogen wird. Zu diesem Zwecke ist das Ende B der Kolbenstange mit einem besonderen Stück, Kreuzkopf genannt, versehen, das gezwungen ist, zwischen den feststehenden Führungen E, E zu gleiten.

Cavé hat die Uebertragung der Bewegung des Kolbens auf die rotirende Welle dadurch noch mehr vereinfacht, dass er die Bleuelstange ganz wegliess und die Kolbenstange direkt mit der Kurbel verband. Aber zu diesem Behufe musste er den Cylinder A

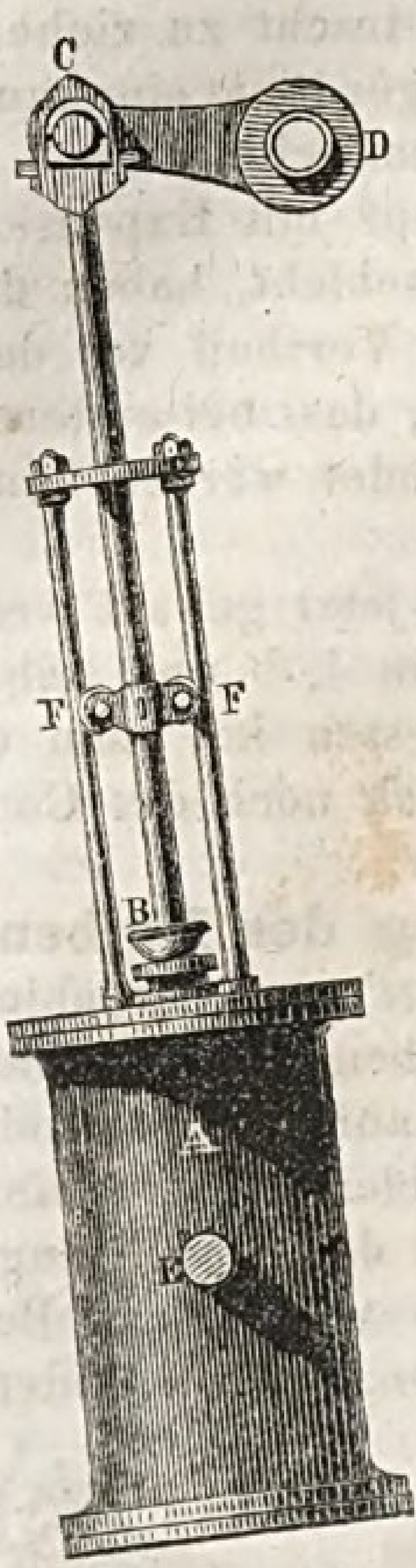


Fig. 614.

(Fig. 614) beweglich machen, damit die Kolbenstange in allen Stellungen, welche sie in Folge ihrer Verbindung mit der Kurbel CD annehmen muss, stets nach der Achse des Cylinders gerichtet bleiben kann. Aus diesem Grunde wird der Cylinder A durch zwei Zapfen E getragen, um welche er sich in schwingender Bewegung bald nach der einen, bald nach der anderen Seite drehen kann. Desshalb gibt man den Maschinen dieser Art auch den Namen Maschinen mit oscillirendem Cylinder. Damit die Kolbenstange dem Cylinder stets die passende Lage geben kann, versieht man sie mit zwei Frictionsrollen F, F, welche an zwei Stangen gleiten, die am Deckel des Cylinders festgemacht sind. Da die Zapfen E die einzigen Theile des Cylinders sind, welche, abgesehen von ihrer Drehbewegung, ihre Stellung während der Bewegung der Maschine beibehalten, so hat man sie hohl gemacht und leitet durch das Innere des einen von ihnen den Dampf aus dem Kessel in den Cylinder, während durch den andern der ausgediente Dampf austritt. Der Steuerungsapparat, welcher zur Vertheilung des Dampfes dient, wird von dem Cylinder getragen und oscillirt mit diesem.

§. 477. **Dampfkessel.** — Die Erzeugung des zur Bewegung der Dampfmaschinen erforderlichen Dampfes geschieht in Kesseln von sehr verschiedener Form. Die ersten Dampfkessel, welche angewendet wurden, waren kugelförmig oder hatten wenigstens die Gestalt eines Theils einer Kugel mit ebenem Boden. Diese Form, welche sich zuerst am natürlichsten darbot, hat den grossen Nachtheil, dass sie bei einer bedeutenden Wassermasse nur eine verhältnissmässig geringe Oberfläche darbietet, und dieser Umstand ist für die Dampferzeugung offenbar wenig günstig. Desshalb hat *Watt* seinen Kesseln eine ganz andere Gestalt und Einrichtung gegeben. Er nahm die Form eines langgestreckten Cylinders an, der als Querschnitt eine theilweis einwärts gebogene Curve besitzt. Die *Watt*'schen Kessel konnten auf diese Weise bei gleich grossem Rauminhalt mit einer viel grösseren Fläche der direkten Einwirkung des Feuers ausgesetzt werden als die zuvor gebrauchten.

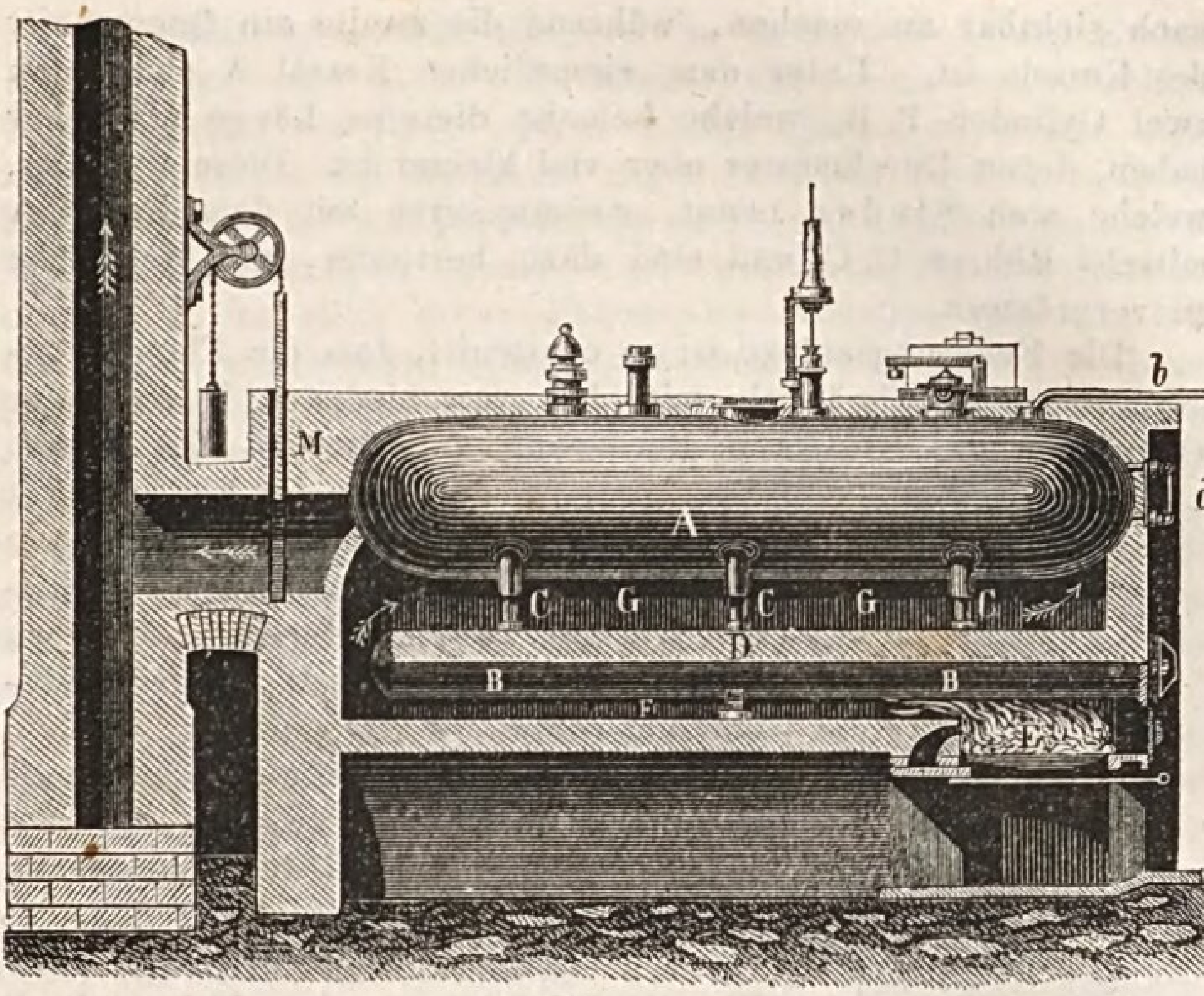


Fig. 615.

Die Cylindergestalt ist diejenige, welche man noch heute bei der Construction der Dampfkessel anwendet. Aber man hat den Querschnitt des Cylinders in Folge der grösseren Spannkraft, welche man dem Dampf jetzt gewöhnlich gibt, abändern müssen. Man begreift in der That leicht, dass, wenn der Kessel einwärts gebogene Theile besitzt und der durch den Dampf in seinem Innern ausgeübte Druck bedeutend grösser als der der äusseren atmosphärischen Luft ist, dieser Drucküberschuss die Gestalt des Kessels zu ändern sucht, indem er die einwärts gebogenen Theile nach aussen drückt; selbst ebene Flächen, wenn solche vorhanden sind, müssen durch die Wirkung dieses Drucküberschusses convex werden. Damit also die Gestalt des Kessels nicht abgeändert werde und damit derselbe überall gleich gut dem inneren Druck widerstehe, gibt man ihm die Gestalt eines Cylinders mit kreisförmigem Querschnitt, der sich an beiden Enden in Kugelabschnitten, häufig sogar in Halbkugeln endigt. Dies ersieht man aus den Figuren 615 und 616, von denen die erste einen Längendurchschnitt des Mauerwerks des eingemauerten Kessels gibt, der dazu bestimmt ist, den Kessel seiner ganzen Länge

nach sichtbar zu machen, während die zweite ein Querschnitt des Kessels ist. Unter dem eigentlichen Kessel A sieht man zwei Cylinder B, B, welche beinahe dieselbe Länge als jener haben, deren Durchmesser aber viel kleiner ist. Diese Cylinder, welche man Sieder nennt, communiciren mit dem Kessel A mittelst Röhren C, C und sind dazu bestimmt, die Heizfläche zu vergrössern.

Die Feuerungsanlage ist so construirt, dass die Flamme genöthigt wird, allmählich mit den verschiedenen Theilen der Oberfläche des Kessels in Berührung zu kommen. Zu diesem Zwecke ist in der Höhe der Sieder, ihrer ganzen Länge nach, eine horizontale Scheidewand D angebracht; in den beiden Ebenen, welche durch je drei zu beiden Seiten des Kessels liegende Verbindungsröhren C, C gebildet werden, sind zwei vertikale Scheidewände aufgemauert, welche den freien Raum zwischen dem unteren Theil des eigentlichen Kessels und jener horizontalen Scheidewand D in drei Züge abtheilen. Die Flamme, welche von dem Heizraume E ausgeht, gelangt zunächst in den Feuerkanal F, welcher sie an das hintere Ende des Kessels führt. Von da aus geht sie in den Kanal G und kommt so wieder an das vordere Ende des Kessels; hier theilt sie sich in zwei Theile und kehrt durch die Seitenkanäle H, H nach dem hinteren Theil des Kessels zurück. Am Ausgang der Feuerzüge H, H geht die Feuerluft in den Kamin. Das sog. Register M, dessen Gewicht durch ein Gegengewicht balancirt wird, dient dazu, den Kanal, welcher die Feuerzüge mit dem Kamin verbindet, mehr oder weniger zu schliessen und dadurch den Zug zu reguliren.

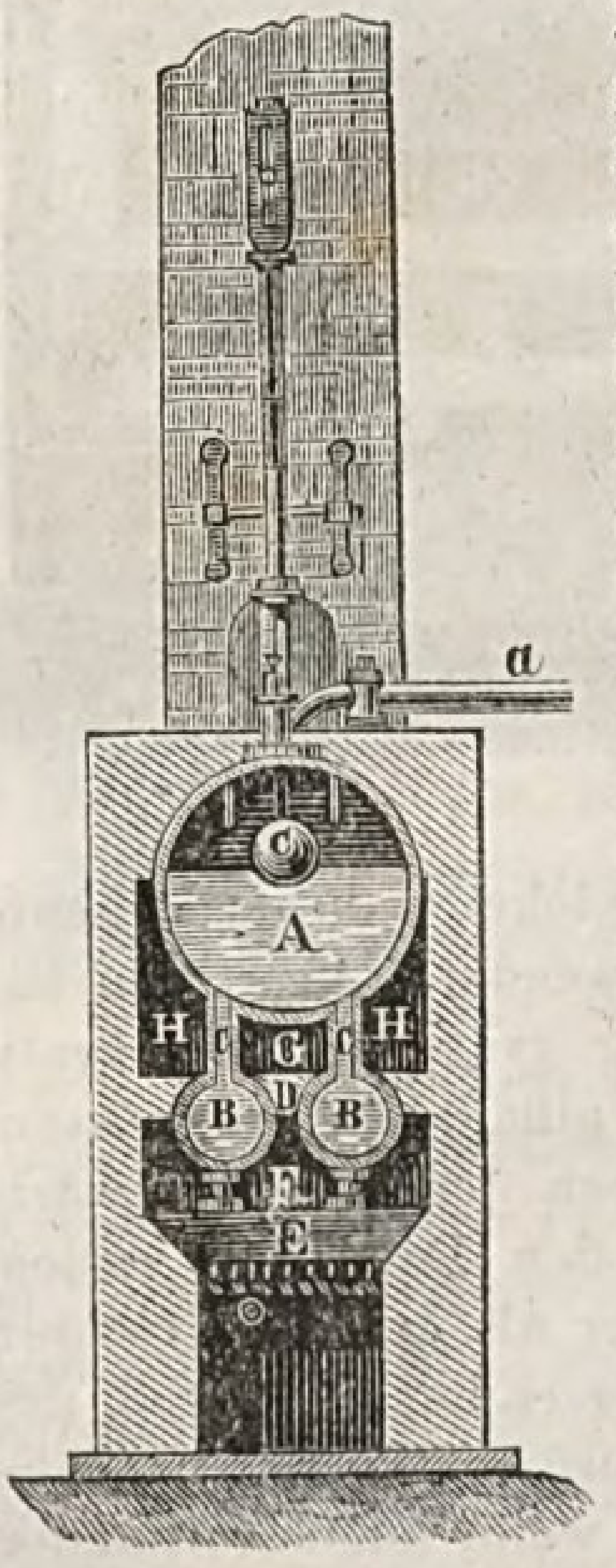


Fig. 616.

Manchmal leitet man in Kesseln, die eine ähnliche Gestalt wie der obige haben, das Feuer auch so, dass sich der Rost unter dem Hauptkessel A befindet und erst das zurückkehrende Feuer die Sieder, welche jetzt Vorwärmer heissen, bestreicht.

Die Kessel mit Siedern, von Eisenblech construirt, werden sehr häufig angewendet, aber sie sind bei weitem nicht die ein-

zigen, welche gebraucht werden. So findet man häufig Kessel ohne Sieder, oder auch wohl Kessel mit einem cylindrischen Rohr, welches sie ihrer ganzen Länge nach durchdringt und innerhalb dessen der Heizraum angebracht ist; oder auch noch Kessel, welche der Länge nach von mehreren engeren parallelen Röhren durchdrungen werden, durch welche die Flamme streicht u. s. w. f. In allen diesen Fällen aber, welches auch das für den Kessel angewandte System sein mag, muss man der Heizfläche desselben, d. h. den direkt vom Feuer bespülten Wänden, eine Ausdehnung geben, die im Verhältniss zur Quantität des Dampfes steht, welcher in einer bestimmten Zeit erzeugt werden muss. Die Erfahrung hat gelehrt, dass diese Oberfläche wenigstens $1^1/_2$ Quadratmeter für jede Pferdekraft der Maschine sein muss und dass es noch zweckmässiger ist, sie auf $1^2/_3$ Quadratmeter zu erhöhen.

Eine Röhre, welche man bei *a* (Fig. 616) sieht, geht von der oberen Wand des Kessels aus und dient dazu, den Dampf zur Maschine zu leiten. Eine zweite Röhre *b* (Fig. 615) dient zur Speisung des Kessels, d. h. zur Einführung des Wassers, welches dazu bestimmt ist, dasjenige wieder zu ersetzen, das in Form von Dampf aus dem Kessel entweicht. Diese letztere Röhre dringt in den Kessel ein und endigt inmitten des Wassers, welches er enthält.

§. 478. Seitdem der Dampf als Motor angewendet wird, hat man eine grosse Anzahl von Unglücksfällen zu beklagen, welche durch die Explosionen von Dampfkesseln herbeigeführt wurden. Desshalb hat man sich bemüht, Mittel zu finden, um der Wiederholung ähnlicher Fälle vorzubeugen. Bevor wir aber dazu übergehen, diejenigen dieser Mittel, bei welchen man jetzt stehen geblieben ist, kennen zu lernen, müssen wir zunächst die hauptsächlichsten Ursachen der Kesselexplosionen angeben.

Eine erste Ursache dieser Explosionen, diejenige, welche man anfangs als einzige Quelle derselben betrachtet hat, besteht in der nicht genügenden Festigkeit des Kessels. Wenn man allmählich die Spannung des Dampfes im Innern des Kessels vermehrt, so ist es begreiflich, dass man zuletzt an einem Punkte ankommen muss, wo die Wände des Kessels nicht mehr im Stande sind, der Spannkraft des Dampfes zu widerstehen; sie müssen daher zerreissen, um dem Dampf den Weg ins Freie zu eröffnen. Setzen wir also voraus, dass ein Kessel zu wenig Festigkeit besitze, so dass diese Grenze des Widerstandes, welche nicht überschritten werden darf, einer Spannung entspricht, welche der

Dampf während des Gangs der Maschine annehmen kann, so muss daraus nothwendig eine Explosion folgen.

Aber es ist sehr selten, dass der Vorgang so wie eben beschrieben stattfindet. Die meisten Explosionen entspringen daraus, dass gewisse Theile der Kesselwände zufällig auf eine sehr hohe Temperatur gebracht werden und dann plötzlich in Berührung mit einer gewissen Quantität Wasser kommen. Man begreift leicht, dass unter diesen Umständen aus verschiedenen Ursachen eine Explosion entstehen muss. Erstens verdampft das Wasser, welches mit den durch die Wirkung des Feuers glühend gewordenen Theilen der Kesselwand in Berührung kommt, mit grosser Heftigkeit, wodurch eine plötzliche Vermehrung des Druckes im Innern des Kessels hervorgebracht wird. Zweitens führt die fast augenblickliche Abkühlung, welche diese glühenden Wandtheile des Kessels erfahren, eine Aenderung in ihrer molekularen Constitution herbei und erleichtert auf diese Weise ihr Zerreissen unter der Wirkung des inneren Druckes.

So lange der Theil der Wände eines Kessels, welcher aussen in Berührung mit der Flamme ist, innen vom Wasser bespült bleibt, hat man nicht zu befürchten, dass die Wirkung, von der wir eben gesprochen haben, eintritt. Aber dem ist nicht mehr so, wenn das Niveau des Wassers im Kessel unter die höchsten Punkte der Feuerzüge, in welchen die Flamme circulirt, herabsinkt. Man sieht, dass in diesem Fall die Theile der Kesselwände, welche zwischen dem Niveau des Wassers und den obersten Stellen der Feuerzüge gelegen sind, leicht glühend werden können; und wenn dann das Wasser in Folge der heftigen Bewegungen, von welchen das Kochen immer begleitet ist, gegen diese glühenden Wände geworfen wird, so kann daraus die Explosion entstehen.

Das zur Speisung eines Dampfkessels angewandte Wasser enthält gewöhnlich feste Bestandtheile, aufgelöst oder auch blos suspendirt, welche sich in einer allmählich immer dicker werdenden Kruste, dem sog. Kesselstein, in dem Kessel ablagern. Da in Folge dessen die unteren Wände des Kessels nicht mehr in direkter Berührung mit dem Wasser sind und da der Kesselstein nur ein schlechter Wärmeleiter ist, so können jene Wände eine viel höhere Temperatur annehmen, als wenn diese Ablagerung nicht vorhanden wäre. Wenn hierauf durch irgend eine Ursache Risse in dieser Kruste entstehen, so dringt das Wasser in dieselben ein, verwandelt sich in Berührung mit den heisseren Theilen der Wände in Dampf, und, indem es auf diese Weise den Kesselstein lossprengt, entblösst es in grösserer oder geringerer Ausdehnung

die Wandtheile, welche derselbe bedeckt hat. In dieser Weise entstehen sehr häufig Explosionen.

Die Dampfkesselexplosionen sind gewöhnlich von ausserordentlichen mechanischen Wirkungen begleitet: so werden oft sehr schwere Stücke auf grosse Distanzen fortgeschleudert. Man würde sich von diesen Wirkungen kaum Rechenschaft geben können, wenn man sie aus der Wirkung des Dampfes, welcher im Moment der Explosion im Kessel vorhanden ist, allein erklären wollte, selbst wenn man diesem Dampf eine bedeutende Wirkung zuschreiben würde. Aber man muss bedenken, dass die in dem Kessel enthaltene Wassermasse, indem sie plötzlich in Verbindung mit der atmosphärischen Luft gesetzt wird, eine bedeutend höhere Temperatur als 100° hat, wodurch sie mit einem Mal grösstentheils verdampft und so fast augenblicklich eine ausserordentlich grosse Menge Dampf erzeugt. Dieser im Moment der Explosion selbst erst gebildete Dampf ist es, welcher die ausserordentlichen mechanischen Wirkungen, die man beobachtet, hervorbringt.

§. 479. Sehen wir nun, welches die Mittel sind, welche man angewendet hat, um zu verhüten, dass die Umstände, die wir soeben bezeichnet haben, eintreten können.

Damit ein Kessel überhaupt angewendet werden darf, muss er in den meisten Ländern mit einem Stempel versehen sein, welcher die Anzahl der Atmosphären angibt, die der Dampf in seinem Innern nicht überschreiten darf. Diese Stempelung des Kessels geschieht amtlich, nachdem zuvor der Dampfkessel einer Prüfung unterworfen worden ist, welche darin besteht, dass man ihn mit Wasser vollfüllt und auf dieses Wasser mittelst einer Druckpumpe einen gewissen Druck ausübt. Dieser Druck ist in Bayern der doppelte, in Frankreich der dreifache von dem, welchen die Stempelung angibt.

Damit die Spannung des Dampfes im Kessel die Grenze, für welche der Kessel geprüft worden ist, nicht übersteigen kann, bringt man eines oder mehrere Sicherheitsventile an demselben an. Die Figur 617 zeigt die Einrichtung eines solchen. Das Ventil A befindet sich am Ende einer vertikalen Röhre, welche unten mit dem Kessel in Verbindung steht. Ein Hebel BC, der um den Punkt C beweglich ist, stützt sich in D auf den Kopf des Ventils. Am Ende B dieses Hebels ist ein Gewicht aufgehängt; dasselbe ist von solcher Grösse und so gestellt, dass es auf das Ventil A von oben nach unten einen Druck ausübt, gleich demjenigen, welchen dasselbe von unten nach oben von

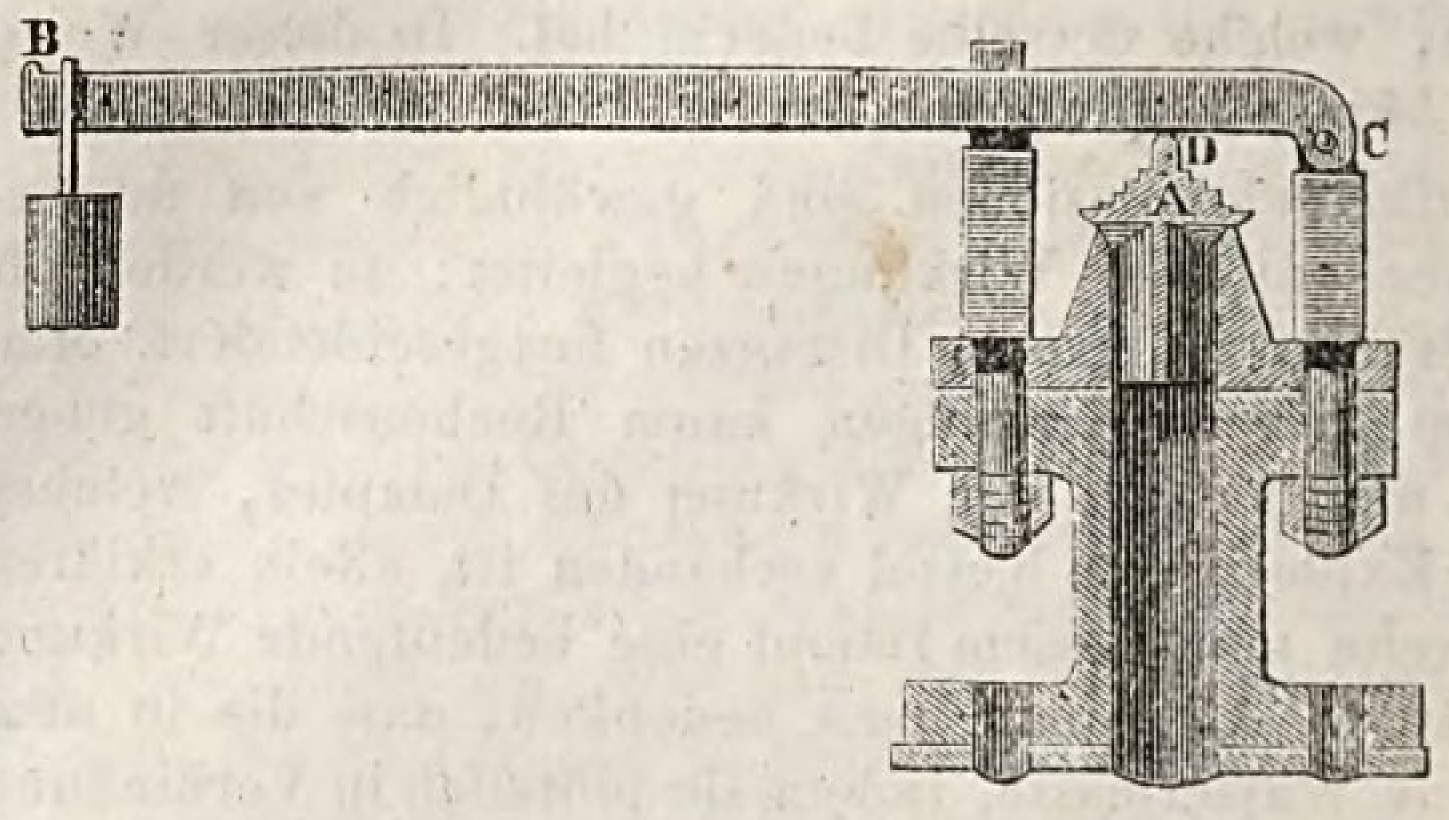




Fig. 618.



Fig. 617. Fig. 619.

Seite des Dampfes erfährt, wenn seine Spannkraft den Werth erreicht hat, welchen sie nicht überschreiten darf.

Die Figur 618 zeigt das Ventil allein und die Figur 619 ist ein horizontaler Durchschnitt desselben, der dazu bestimmt ist, die Einrichtung des Theils sichtbar zu machen, welcher in die Röhre, die verschlossen werden soll, eindringt. Dieser untere Theil des Ventils wird von drei Flügeln gebildet, welche es in seiner Bewegung führen sollen, wenn es durch einen Ueberschuss der inneren Spannung gehoben wird, und welche so eingerichtet sind, dass sie sich dem Austritt des Dampfes im Kessel so wenig als möglich widersetzen.

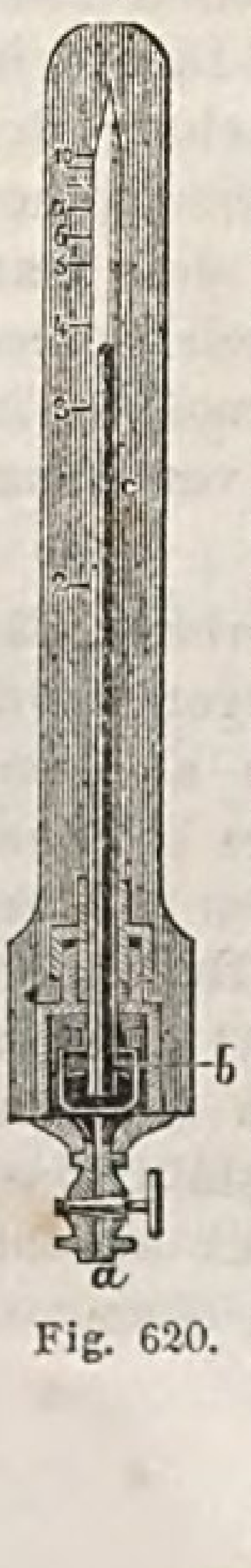


Fig. 620.

§. 480. Es ist von Wichtigkeit, dass der Heizer jeden Augenblick die Spannung des Dampfes im Kessel kennen lernen kann, um sich beim Feuern darnach richten und diese Spannkraft in geeigneten Grenzen erhalten zu können. Zu diesem Zwecke bringt man an dem Kessel ein Manometer an, welches fortwährend mit dem Dampf im Innern desselben in Verbindung steht. Man bediente sich dabei früher häufig eines Manometers mit verdichteter Luft (Fig. 620), dessen Princip wir schon oben (§. 313) angegeben haben. Der Dampf kommt bei *a* an und übt seinen Druck auf die Oberfläche des Quecksilbers im Gefäss *b* aus; in dieses Gefäss taucht eine Glasröhre *c*, welche Luft enthält und oben geschlossen ist. Das obere Ende der Quecksilbersäule in dieser Glasröhre zeigt an der Scala, welche hinter der Röhre angebracht ist, die Spannkraft des Dampfes in Atmosphären.

Wenn die Spannkraft des Dampfes ca. 4 Atmosphären nicht überschreitet, kann das Manometer mit ver-

dichteter Luft durch ein solches mit freier Luft (§. 312) ersetzt werden. Dieses Manometer, dessen Anzeigen sicherer als die des vorhergehenden sind, hat indessen einen ziemlich grossen Uebelstand: die grosse Länge, welche die Röhre, die das Quecksilber enthält, erhalten muss. Da man in diesem Falle keine Glasröhre mehr nehmen kann, so wendet man manchmal die in Fig. 621 dargestellte Einrichtung an. Der Dampf, welcher bei *a* ankommt, übt seinen Druck auf die Oberfläche des Quecksilbers im Gefäss *b* aus und drückt es in der Röhre *cc*, welche oben offen ist, in die Höhe. Ein Schwimmer *d* stützt sich fortwährend gegen die obere Kuppe des Quecksilbers und ist an einem Faden aufgehängt, welcher über eine Rolle geht und an seinem anderen Ende ein Gegengewicht *e* trägt. Die Bewegungen der Quecksilbersäule werden durch dieses Gegengewicht, das sich stets im entgegengesetzten Sinn längs einer Scala bewegt und welches sehr leicht zu beobachten ist, angezeigt.

Die Figur 622 zeigt eine andere Einrichtung des Manometers mit freier Luft, bei welcher sich das obere Ende der Quecksilbersäule in viel geringerer Ausdehnung auf- und abbewegt. Der Dampf aus dem Kessel kommt bei *a* an und communicirt frei mit dem Innern eines Raumes *b*. Vom unteren Theil dieses Raumes geht eine Metallröhre *cc* aus, welche anfangs abwärts geht und sich hierauf krümmt, um bei *dd* wieder aufwärts zu steigen und in eine Glasröhre *e*, welche viel weiter als sie ist, zu endigen. Oben geht von dieser Glasröhre eine Röhre *ff* aus, welche in das Gefäss *g* eindringt, ohne die Ränder



Fig. 621.

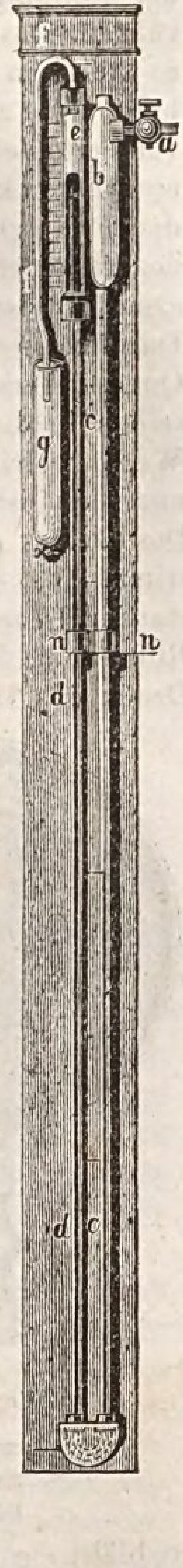


Fig. 622.

der Oeffnung, durch welche sie in dessen Inneres eintritt, zu berühren. Das Quecksilber befindet sich in der gebogenen Röhre *cd*; es steigt in *c* unter der Wirkung des Dampfes abwärts und erhebt sich zu gleicher Zeit in *d* bis in die Glasröhre *e*, wo es von Seite der atmosphärischen Luft, welche frei durch die Röhre *f* eindringen kann, gedrückt wird. Der Höhenunterschied des Niveaus der Flüssigkeit in beiden Armen der Röhre *cde* dient als Maass des Ueberschusses des Druckes des Dampfes über den der äusseren atmosphärischen Luft. Nun hat wegen der Verschiedenheit der Durchmesser der Röhren *c* und *e* eine beträchtliche Senkung des Quecksilbers in der ersten Röhre nur eine geringe Hebung desselben in der zweiten zur Folge; daraus geht hervor, dass der Weg, welchen die Oberfläche des Quecksilbers in *e* durchläuft, nur klein ist, wenn sich auch der Druck des Dampfes viel ändert. Das Gefäss *g*, in welches sich die Röhre *f* endigt, ist dazu bestimmt, das Quecksilber in dem Falle aufzunehmen, wo es ein zu starker Druck des Dampfes in dem Kessel aus der gekrümmten Röhre *cde* hinaustreibt. Die Scala neben der Röhre *e* gibt den Druck des Dampfes in Atmosphären an.

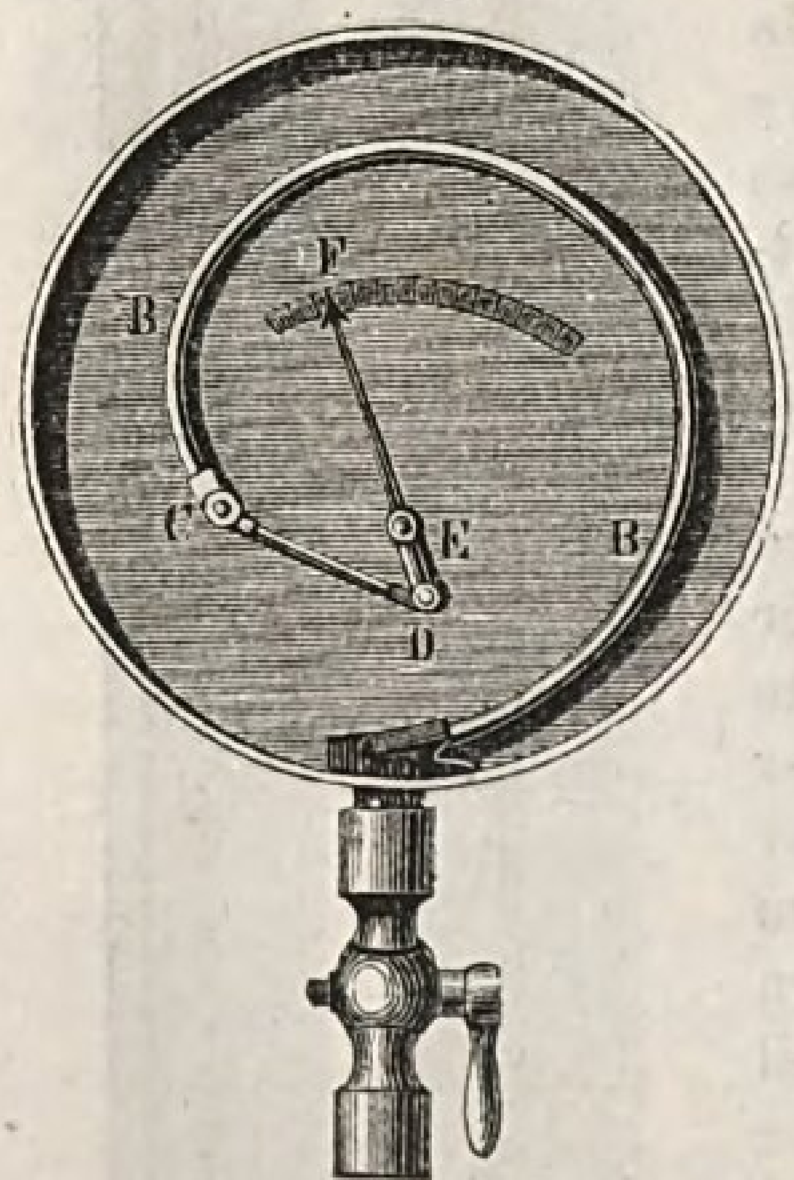
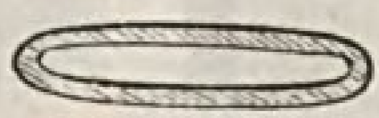


Fig. 623.


Fig. 624

Ganz neuerdings wendet man sehr häufig die sog. Metallmanometer an. Das wesentlichste Stück des von *Bourdon* erfundenen Manometers dieser Art besteht in einer gekrümmten Röhre B (Fig. 623) von Kupfer oder Stahl, innerhalb welcher der Druck des Dampfes wirkt. Das eine Ende dieser Röhre ist an dem Punkte befestigt, wo die Röhre A, durch welche der Dampf aus dem Kessel kommt, endigt; ausserdem ist die Röhre B an keinem anderen Punkt an der Büchse, welche sie enthält, festgemacht. Ihr Ende C ist geschlossen. Der Querschnitt der Röhre ist nicht kreisförmig, sondern eine lang gestreckte, ellipsenartige Curve, wie sie die Figur 624 zeigt. Wenn der Dampf des Kessels mit dem Innern der Röhre B in Verbindung steht, so bläht sie der Druck, welchen er gegen ihre Wände ausübt, ein wenig auf, indem er die Abplattung ihres Querschnitts ver-

mindert; diese leichte Aufblähung hat eine Aenderung in der Krümmung der Röhre zur Folge, welche sich in dem Maasse als der Druck im Innern zunimmt, gerade zu richten und einen kreisförmigen Querschnitt anzunehmen sucht. Daraus folgt, dass das Ende C seinen Ort verändert; es bewegt dadurch einen Zeiger DEF, mit welchem es durch den Stab CD verbunden ist. Dieser Zeiger, der sich um den Punkt E bewegen kann, zeigt mit seinem Ende F auf den betreffenden Punkt eines getheilten Bogens, dessen Eintheilung so gemacht worden ist, dass die Stellung des Zeigers den Druck des Dampfes in Atmosphären angibt. Das Metallmanometer von *Bourdon* ist viel bequemer als die vorhergehenden, deren Glasröhren leicht zerbrechlich sind, was ausser anderen Unannehmlichkeiten auch noch den Verlust an Quecksilber zur Folge hat; aber es ist nothwendig, dass man sich von Zeit zu Zeit versichert, ob die Angaben, welche es liefert, noch genau sind, weil unter dem längeren Einfluss der Drückungen, welche die gekrümmte Röhre in ihrem Innern zu erleiden hat, ihr Molekularzustand langsamen Veränderungen ausgesetzt ist.

Eine grössere Verbreitung als die *Bourdon*'schen haben in neuester Zeit die Metallmanometer von *Schäffer* und *Budenberg* gefunden, bei welchen die elastische Röhre durch eine gewellte, dünne Stahlplatte ersetzt ist, gegen welche der Dampf drückt. Dadurch wird sie mehr oder weniger eingebogen und setzt auf diese Weise einen Zeiger in Bewegung, ähnlich wie beim *Bourdon*'schen Manometer.

§. 481. Nach dem, was wir oben über die Ursache der Kesselexplosionen gesagt haben (§. 478), muss man es besonders zu verhüten suchen, dass Theile der Wände aussen in Berührung mit der Flamme kommen, ohne innen vom Wasser bespült zu sein, gleichviel, ob dies in Folge des Kesselsteines oder in Folge davon, dass sich die Oberfläche des Wassers im Kessel zu sehr senkt, eintritt.

Vor den Wirkungen der ersten dieser beiden Ursachen kann man sich nur dadurch Schutz verschaffen, dass man das Innere des Kessels häufig reinigt. Man wendet auch manchmal ein besonderes Mittel an, welches darin besteht, gewisse Substanzen in den Kessel zu bringen, die je nach der Natur des aus dem Wasser sich bildenden Niederschlags verschieden sind und den Zweck haben, zu verhindern, dass dieser Niederschlag erhärtet.

Was die Höhe des Wasserstandes im Kessel betrifft, so muss derselbe Gegenstand einer fortgesetzten Ueberwachung von Seiten

des Heizers sein; zu diesem Zweck sind Apparate an dem Kessel angebracht, die in jedem Augenblick angeben, in welcher Höhe die Oberfläche des Wassers im Kessel steht. Unter diesen Apparaten führen wir zunächst den Schwimmer *c* (Fig. 616, S. 946) an, welcher zu gleicher Zeit mit dem Niveau des Wassers steigt und fällt, und dessen Bewegung aussen durch einen dünnen, mit ihm verbundenen Stab sichtbar gemacht wird, welcher sich vertikal über ihn erhebt und die Kesselwand durchdringt. Man wendet auch häufig drei Hähne an, die vertikal über einander, der eine in geringer Entfernung vom andern, so angebracht sind, dass der oberste dem höchsten, der mittlere dem mittleren und der unterste dem tiefsten Wasserstand entspricht. Wenn diese Hähne geöffnet werden, soll durch den obersten stets Dampf, durch den untersten stets Wasser ausströmen. Ein drittes Mittel, welches sehr geeignet ist, die Stellung der Oberfläche des Wassers im Kessel anzuzeigen, besteht in einer Glasröhre *d* (Fig. 615, S. 945), welche an ihren beiden Enden mit dem Innern des Kessels in Verbindung steht und an der vorderen Seite desselben so angebracht ist, dass die Höhe des Niveau's bei mittlerem Wasserstand der Mitte ihrer Länge entspricht; das Wasser des Kessels kann frei von unten in die Röhre eintreten und stellt sich darin ebenso hoch wie im Kessel selbst. Am Stande des Niveau's in der Röhre kann also jeden Augenblick die Stellung der Oberfläche des Wassers im Kessel ersehen werden.

Die Mittel, welche wir soeben aufgezählt haben, können nur dann eine zu tiefe Senkung des Wasserspiegels im Kessel verhüten, wenn sie der Heizer sorgfältig und aufmerksam beobachtet; sie werden aber häufig in Folge der Nachlässigkeit dieses Arbeiters unwirksam gemacht. Man hat desshalb einen Apparat erdacht, welcher den Zweck hat, selbst die Aufmerksamkeit des Heizers wachzurufen, wenn die Oberfläche des Wassers sich zu tief gesenkt hat. Dieser Apparat, Lärmschwimmer genannt, wird durch Figur 625 dargestellt. Er besteht aus einem Schwimmer A, der an dem einen Ende eines Hebels ABC befestigt ist, welcher an seinem anderen Ende ein Gegengewicht C trägt. So lange der Wasserstand im Kessel hoch genug ist, wird der Schwimmer A durch die Flüssigkeit von unten nach oben gedrückt; das konische Ventil *a*, welches dieser Hebel trägt, stützt sich auf diese Weise gegen die Oeffnung der vertikalen Röhre *b* und verschliesst diese Oeffnung vollständig. Aber sobald sich das Niveau mehr als zulässig gesenkt hat und mit ihm der Schwimmer A, so verschliesst das Ventil *a* nicht mehr die Röhre *b*

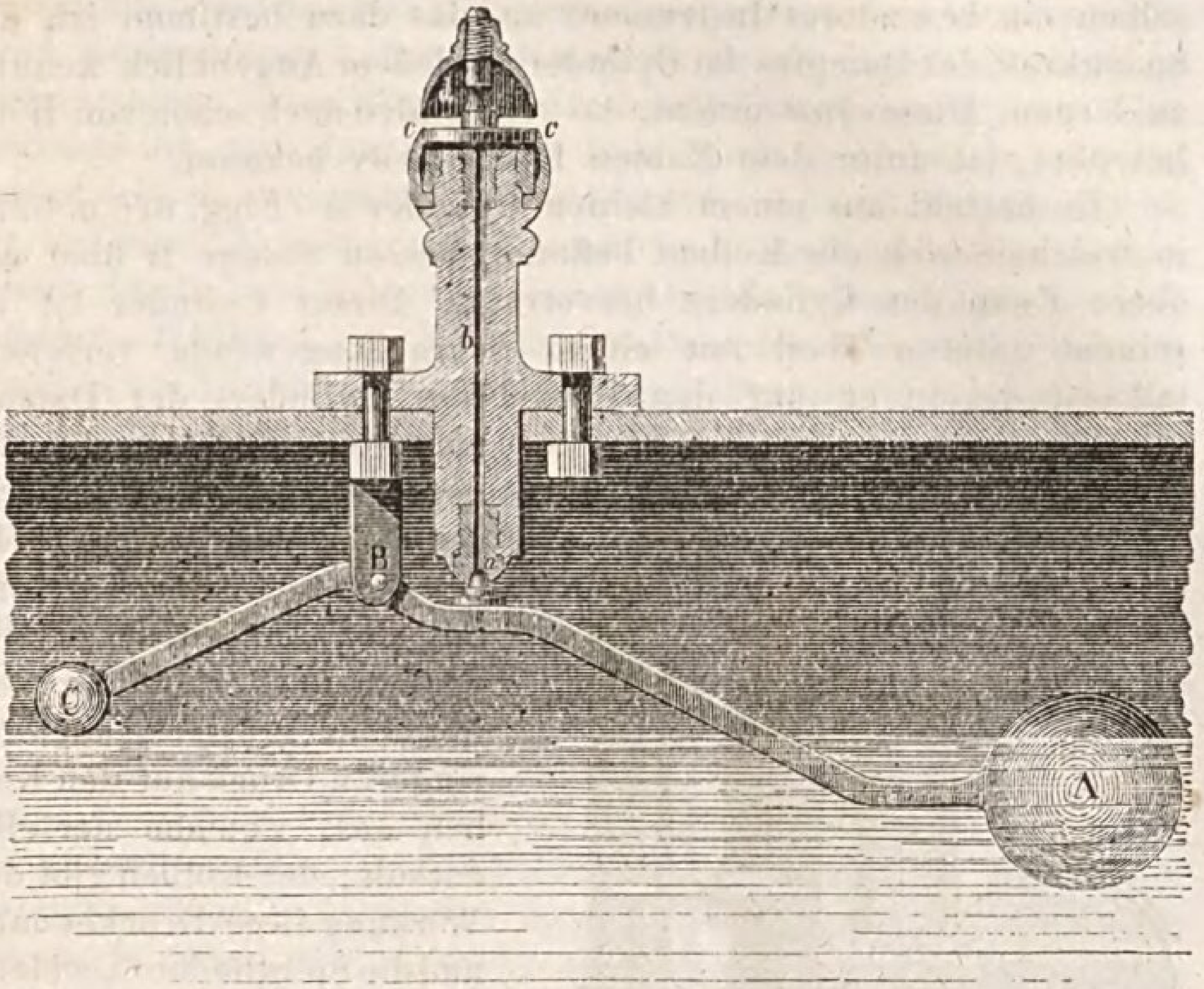


Fig. 625.

und der Dampf strömt durch diese Röhre, um durch die ringförmige Oeffnung *cc* zu entweichen. Der auf diese Weise gebildete Dampfstrahl begegnet den Rändern der Glocke *d* an ihrem ganzen Umfange, wodurch ein durchdringender Pfiff hervorgebracht wird, den Jedermann von den Lokomotiven her kennt, deren Dampfpfeifen auf dieselbe Art eingerichtet sind.

§. 482. **Der Dampfmaschinen-Indicator.** — Die Kenntniss der Spannkraft des Dampfes im Kessel, welche man durch die Anzeigen der Manometer erhält, reicht nicht aus, um die durch die Wirkung des Dampfes auf den Kolben entwickelte Arbeit zu berechnen; denn die Spannkraft des Dampfes ist in Folge der Widerstände, welche sich ihm bei seinem Uebergang aus dem Kessel in den Cylinder entgegensetzen, in letzterem gewöhnlich geringer als in ersterem. Andererseits besteht zu der Zeit, in welcher der Dampf mit Expansion wirkt, gar keine Verbindung zwischen Cylinder und Kessel und das Manometer kann folglich nicht über das Aufschluss geben, was im Cylinder vor sich geht. Aus diesen Gründen bringt man in dem Fall, wo man sich über die Vorgänge während des Gangs einer Dampfmaschine Rechenschaft verschaffen will, an dem Cylinder der-

selben ein besonderes Instrument an, das dazu bestimmt ist, die Spannkraft des Dampfes im Cylinder in jedem Augenblick kennen zu lernen. Dieses Instrument, das seiner Idee nach schon von *Watt* herrührt, ist unter dem Namen Indicator bekannt.

Es besteht aus einem kleinen Cylinder A (Figg. 626 u. 627), in welchem sich ein Kolben befindet, dessen Stange B über das obere Ende des Cylinders hervorragt. Dieser Cylinder ist an seinem unteren Theil mit einem Schraubengewinde versehen, mittelst dessen er auf den Deckel des Cylinders der Dampfmaschine aufgeschraubt werden kann. Wenn der Apparat diese Stellung hat, so steht der Dampf in der Maschine mit dem Innern des Cylinders A in Verbindung und übt einen grösseren oder geringeren Druck auf den Kolben aus, welchen derselbe enthält; der Kolben gibt der Wirkung dieses Druckes nach und die Spiralfeder C, welche seine Stange umgibt, wird um so mehr zusammengedrückt, je grösser die Spannkraft des Dampfes ist. Ein Zeiger, welchen die Stange des kleinen Kolbens trägt, stellt sich auf diese Weise einem der Theilstriche einer Scala gegenüber, welche auf dem Cylinder angebracht ist, und gibt so die Spannkraft des Dampfes zu erkennen.

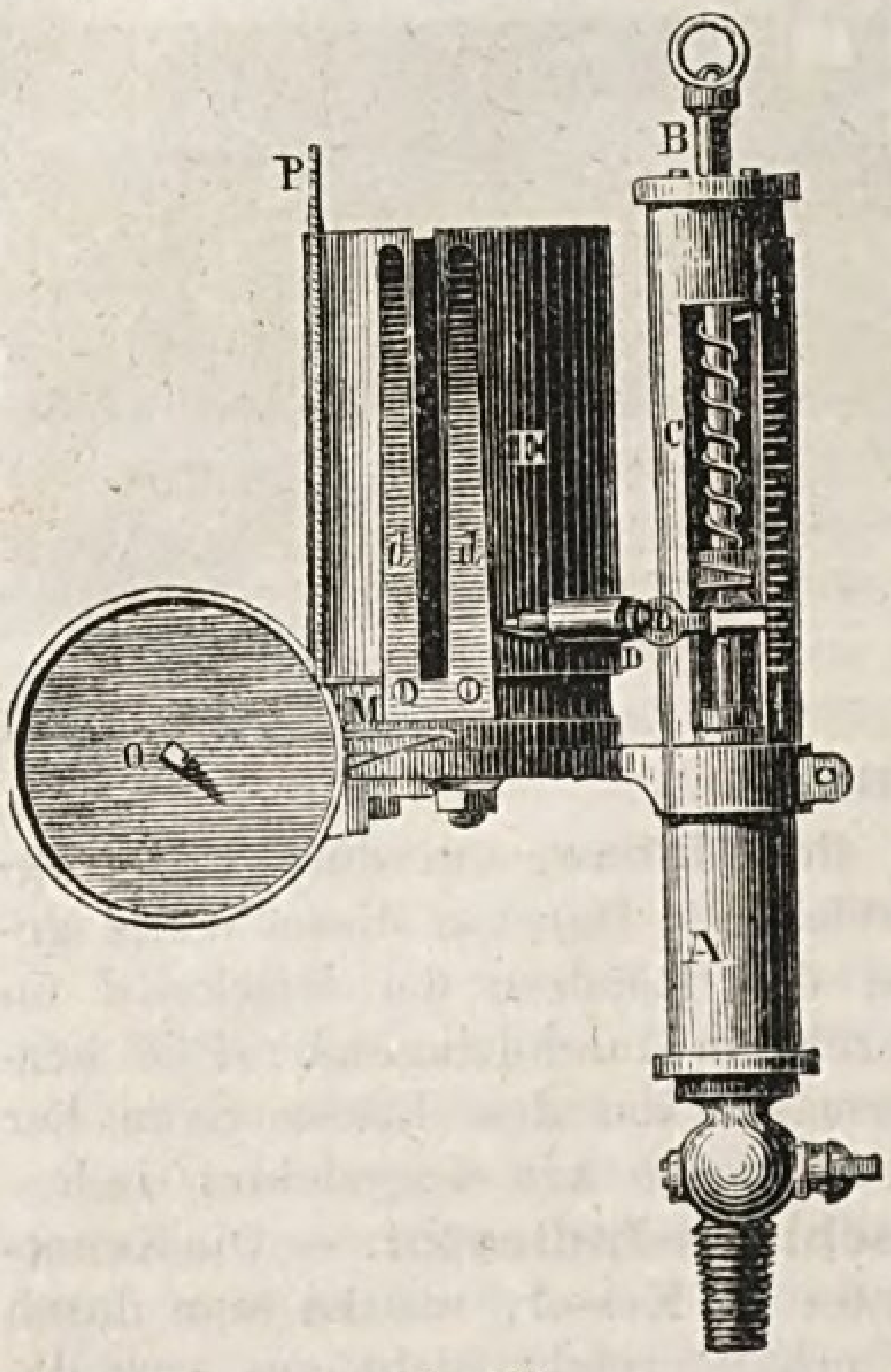


Fig. 626.

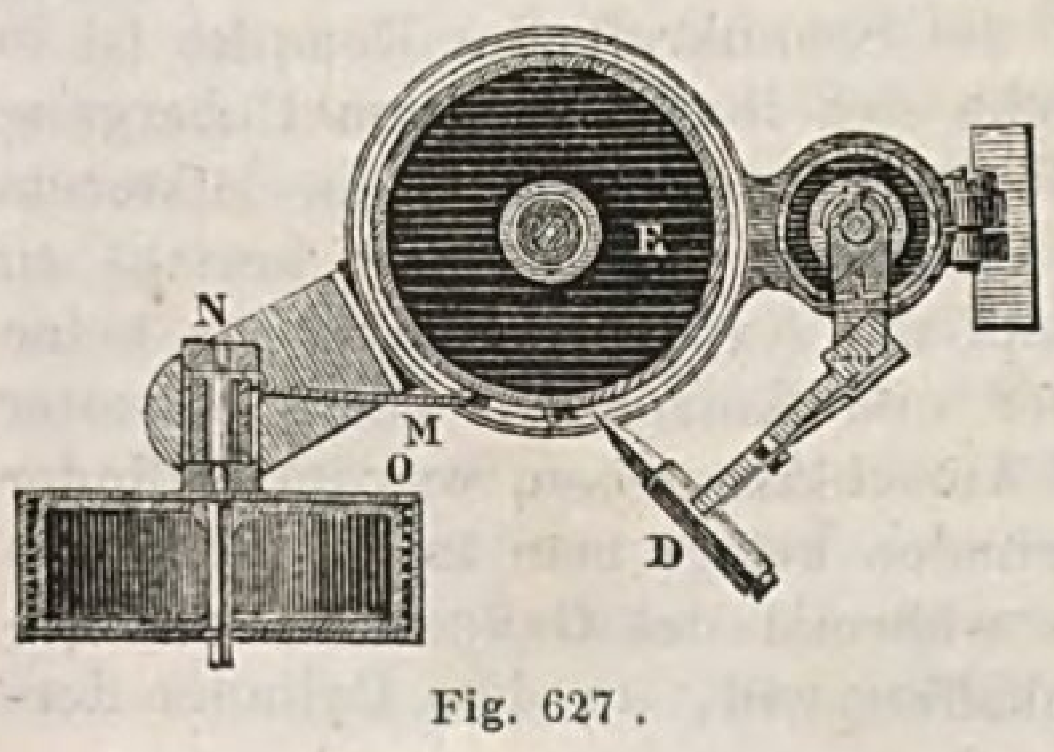


Fig. 627 .

Aber die Schnelligkeit der Bewegung der Maschine, verbunden mit den Aenderungen, welche die Spannkraft des Dampfes während eines einzigen Hubes des Kolbens erfährt, macht, dass der Indicator schwer zu beobachten wäre, wenn er sich auf das

beschränken würde, was wir soeben angegeben haben. Der leichteren Beobachtung halber hat man an der Stange B des kleinen Kolbens einen Bleistifthalter mit Bleistift D angebracht, der dazu bestimmt ist, auf einen um den Cylinder E gewickelten Streifen Papier Linien zu ziehen. Dieser Streifen ist auf der Oberfläche des Cylinders E wohl ausgespannt und wird an seinen beiden Enden durch zwei Federn *d*, *d* festgehalten, unter denen er sich befindet. Während der Kolben der Dampfmaschine sich bewegt, erhält der Cylinder E eine Rotationsbewegung um seine Achse und bietet so der Spitze des Bleistifts die verschiedenen Theile des Papierstreifens dar. Diese Bewegung wird dem Cylinder E durch die Maschine selbst gegeben. Zu diesem Zweck macht eine dünne Schnur P, deren oberes Ende an einem Punkte der Kolbenstange der Dampfmaschine befestigt ist, mehrere Windungen um die Oberfläche einer Rolle O. Die Achse dieser Rolle trägt hinten eine kleine Welle N, um welche sich eine zweite Schnur M wickelt, welche den Hals einer unten an dem Cylinder E angebrachten Rolle umfasst und deren Ende an einem Punkte dieses Halses festgemacht ist. Wenn sich der Kolben der Dampfmaschine in gewissem Sinne bewegt, so zieht er an der Schnur P; diese Schnur dreht die Rolle O und wickelt sich von derselben ab; die Schnur M wickelt sich auf die Welle N auf und dreht so den Cylinder E. Wenn sich der Kolben der Dampfmaschine im entgegengesetzten Sinne bewegt, so kehren die verschiedenen Stücke in Folge der Wirkung einer im Innern des Cylinders E enthaltenen Feder in ihre urprüngliche Stellung zurück, sodass der Streifen Papier, gegen welchen die Spitze des Bleistiftes angedrückt wird, eine abwechselnde Rotationsbewegung erhält, welche durch die hin- und hergehende Bewegung des Kolbens der Dampfmaschine hervorgebracht wird. Die Figur 628 zeigt, wie der Indicator auf dem Deckel des Cylinders einer Dampfmaschine mit vertikalstehendem Cylinder und Balancier aufgeschraubt ist.

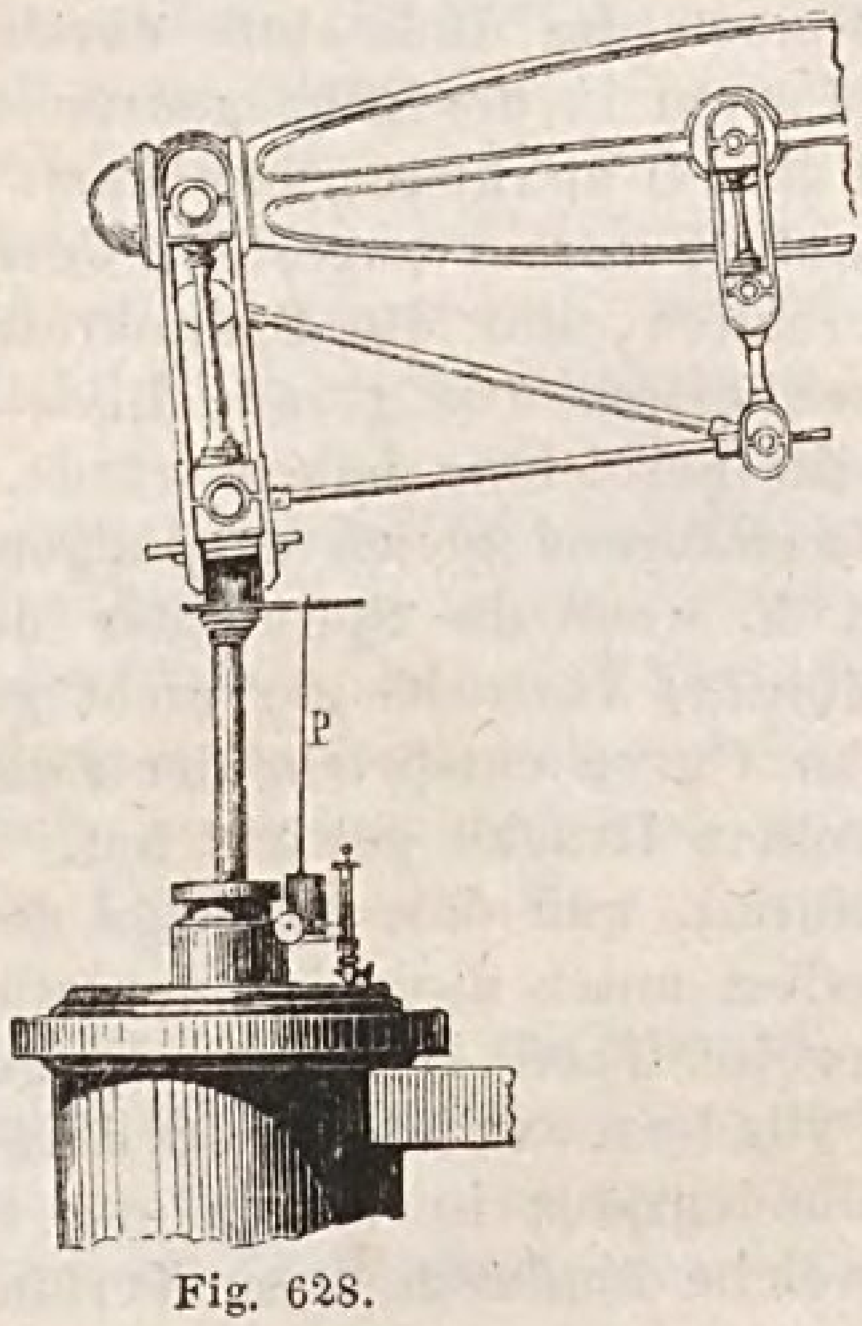


Fig. 628.

Während der Cylinder E allmählich verschiedene Theile des

Papiers, welches ihn bedeckt, unter die Spitze des Bleistiftes D führt, bewegt sich diese letztere selbst mehr oder weniger im Sinne der Länge des Cylinders A, je nach den Aenderungen in der Spannkraft des Dampfes. Daraus folgt, dass der Bleistift auf dem Papier eine krumme Linie zeichnet, deren Gestalt von zwei Bewegungen zugleich abhängig ist und deren Betrachtung die Aenderungen, welche fortwährend in der Spannkraft des Dampfes stattfinden, kennen lehren kann. Man sieht in Fig. 629 eine auf diese Weise mittelst des *Watt*'schen Indicators erhaltene Curve. Der Theil A B C D wurde von dem Bleistift gezeichnet, während der Treibkolben unter der Wirkung des Dampfes abwärts ging; der Theil D E F dagegen, während der Kolben wieder in die Höhe stieg. Die Linie G H ist diejenige, welche die Spitze des Bleistiftes durchlaufen haben würde, wenn der Theil des Cylinders, welcher mit dem Indicator in Verbindung stund, vollständig luftleer gewesen wäre. Die Senkrechte C K, welche von irgend einem Punkte C der Indicatorcurve auf diese gerade Linie G H gefällt wird, misst folglich die Grösse, um welche der kleine Kolben des Indicators durch den Druck des Dampfes in dem Moment in die Höhe gedrückt worden war, wo der Bleistift den Punkt C markirte; man kann also daraus und aus den Versuchen, welche vorher angestellt worden, um die Scala des Indicators zu erhalten, auf die Spannkraft des Dampfes in diesem Moment schliessen. Die gerade Linie L M ist diejenige, welche der Bleistift gezeichnet haben würde, wenn die Spannkraft des Dampfes fortwährend gleich derjenigen der atmosphärischen Luft gewesen, d. h. wenn die Spiralfeder des Indicators während der ganzen Zeit des Versuchs gar nicht gespannt worden wäre. Der Theil A B der Curve entspricht der Zeit, während welcher der Dampf mit vollem Drucke gewirkt hat. Man sieht, dass hierauf Expansion eintrat, und dass in Folge derselben die Spannkraft des Dampfes selbst unter diejenige der atmosphärischen Luft herabsank. Der zweite Theil D E F wurde gezeichnet, während der Theil des Cylinders, welcher mit dem Indicator communicirte, mit dem Condensator in Verbindung stand. Während der ganzen Zeit, welche hindurch diese Verbindung stattfand, blieb der von dem

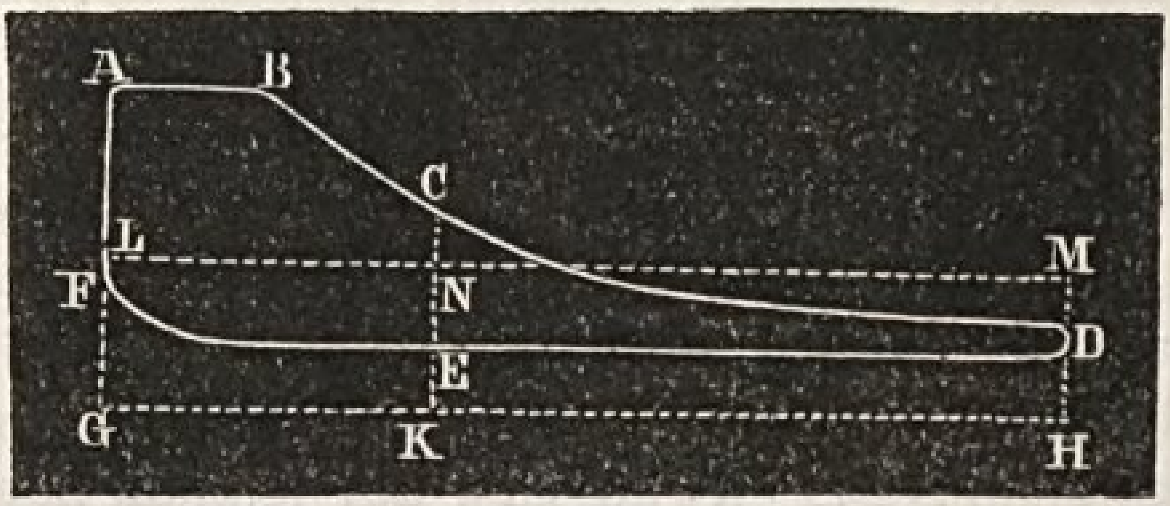


Fig. 629.

Indicator angezeigte Druck fortwährend unter einer halben Atmosphäre, ausgenommen gegen das Ende derselben, wo er in Folge der vorhergegangenen Unterbrechung dieser Verbindung erhöht wurde.

Aber die mittelst eines *Watt*'schen Indicators erhaltene Curve lehrt nicht blos die Aenderungen kennen, welche die Spannkraft des Dampfes in dem Cylinder einer Dampfmaschine erfährt, sondern sie lässt auch noch die Arbeit berechnen, welche die Maschine während jedes Kolbenhubes leistet. Die Linien GH oder LM bezeichnen den Weg, welchen der Kolben bei einem Hin- und Hergang durchläuft; wenn man diese Linien in Metern und die darauf senkrechten Linien CK, AG etc. in Kilogrammen ausdrückt, so sieht man mit grösster Leichtigkeit, dass der Dampf während der niedersteigenden Bewegung des Kolbens eine Arbeit leistet, deren Grösse, in Kilogrammmetern ausgedrückt, durch den Flächeninhalt der Figur GABCDHG ausgedrückt wird. Während dessen leistet der auf der Gegenseite des Kolbens wirkende Dampf eine Widerstandsarbeit gleich dem Flächeninhalt der Figur GFEDHG, sodass die wirklich von der Maschine während eines Kolbenhubes geleistete Arbeit durch den Flächeninhalt der Figur ABCDEFA ausgedrückt wird.

In neuester Zeit hat *Richards* den oben beschriebenen Indicator dahin modificirt, dass er dem Bleistift nicht direkt die Bewegung des Indicatorkolbens mittheilt, sondern erst durch Vermittlung eines feinen Hebelwerks, welches die Bewegung des letzteren vergrössert. Dadurch wird es möglich, den Indicatorkolben einen kleineren Weg machen zu lassen, also die über ihm befindliche Feder stärker zu machen, wodurch die Oscillationen, welche bei Anwendung des ursprünglichen Indicators auf schnellgehende Maschinen, namentlich Lokomotiven, unvermeidlich waren, beseitigt werden.

Auf diese Weise ist der Dampfmaschinen-Indicator eines der werthvollsten Instrumente in der Hand des Ingenieurs geworden. Er gestattet nicht blos, jeden Fehler, den eine Dampfmaschine betreffs der Dampfvertheilung etwa hat, sofort aufzufinden, sondern es kann mit ihm auf's Leichteste und ohne den Gang der Maschine zu stören, die Leistung derselben aufgefunden werden.

§. 483. **Einiges über den Verbrauch und die zweckmässigste Benützung des Brennmaterials bei den Dampfmaschinen.** — Das Brennmaterial, welches zur Heizung der Dampfkessel angewendet wird, besteht aus Steinkohlen oder Koks

oder Torf, seltner aus Holz. Aus den Experimenten, welche mit ersteren angestellt worden sind, folgt, dass die Verbrennung eines Kilogrammes Steinkohle ungefähr 7500 und die eines Kilogrammes Koks ungefähr 6000 Wärmeeinheiten (s. §. 459) liefert. Aus der Tabelle 23 auf Seite 901 folgt, dass die Wärmemenge, welche zur Verwandlung eines Kilogrammes kalten Wassers in gesättigten Dampf von 4 bis 6 Atmosphären Spannkraft erfordert wird, nahezu 650 Wärmeeinheiten beträgt. Wenn folglich alle Wärme, welche durch die Verbrennung entwickelt wird, allein zur Erzeugung von Dampf verwendet würde, so würde ein Kilogramm Steinkohle $11^k,5$ Dampf erzeugen und ein Kilogramm Koks $9^k,2$. Aber es ist unmöglich, auf diese Weise die ganze entwickelte Wärme nutzbar zu machen. Einestheils müssen die Gase, welche durch die Verbrennung entstehen und durch den Kamin entweichen, nothwendig eine ziemlich hohe Temperatur behalten und nehmen dadurch einen bedeutenden Theil der producirten Wärme mit sich fort. Andererseits enthält die Luft, welche zu dem in Brand befindlichen Brennmaterial geführt werden muss, um die Verbrennung zu unterhalten, eine grosse Menge Stickstoff und selbst der Sauerstoff, den sie enthält, wird nicht vollständig verbraucht, sodass eine bedeutende Masse Gas unnützer Weise durch's Feuer zieht, sich mit den Verbrennungsprodukten vermischt und auf diese Weise einen weiteren Theil der entwickelten Wärme absorbirt. Wenn man damit noch verbindet, dass die Verbrennung in den Heizräumen der Dampfkessel selten ganz vollständig ist und dass noch ein Theil der Wärme theilweise durch Strahlung nach aussen, theilweise durch allmähliche Fortpflanzung in dem Mauerwerke des Feuerherdes verloren geht, so wird man einsehen, dass man in Wirklichkeit weit davon entfernt ist, die vorhin angegebenen Resultate zu erzielen. Die Erfahrung zeigt in der That, dass in den Feuerherden und Kesseln von bester Construction das Gewicht des durch 1 Kilogramm Steinkohle verdampften Wassers höchstens 7 bis 8 Kilogramme beträgt.

Wenn man an der Welle, welcher eine Dampfmaschine eine Rotationsbewegung ertheilt, ein Bremsdynamometer (§. 243) anbringt, um die Arbeit, welche die Maschine zu leisten im Stande ist, zu bestimmen, so findet man, dass bei guten Maschinen mit Expansion und Condensation 1 Kilogramm Dampf ungefähr 25000 Kilogrammmeter Nutzarbeit liefert. Wenn man hiezu das nimmt, was wir oben bezüglich der Menge Dampf gesagt haben, welche durch 1 Kilogramm Steinkohle erzeugt wird, so wird man sehen,

dass der Verbrauch an Steinkohlen per Stunde und Pferdekraft, also per 270000 Kilogrammmeter, ungefähr $1^k,5$ beträgt. Dies ist aber freilich nur für die besten und für grosse Maschinen der Fall; bei kleineren und weniger guten Maschinen kann der Brennmaterialverbrauch auf 4 und 5^k Steinkohle per Stunde und Pferdekraft steigen.

§. 484. Um möglichst gute Resultate mit einer Dampfmaschine zu erreichen, ist es nothwendig, alle möglichen Mittel anzuwenden, um die Condensation des Dampfes von dem Augenblick an, wo er sich im Kessel bildet, bis zu dem Augenblick, wo er aufhört, in der Maschine zu wirken, zu verhüten. Zu diesem Zwecke muss die Röhre, welche den Dampf aus dem Kessel in die Maschine führt, mit schlechten Wärmeleitern, wie mit Stroh oder besser noch mit Wolle, umwickelt werden. Ausserdem muss auch dafür gesorgt werden, dass die Wärmestrahlung des Cylinders nach aussen vermieden ist. Man erreicht dies, indem man um den Cylinder einen zweiten von etwas grösseren Dimensionen legt und in dem ringförmigen Raum, welcher zwischen den beiden Cylindern frei bleibt, dem sog. Dampfhemde, den ausgedienten oder noch besser den frisch aus dem Kessel kommenden Dampf circuliren lässt. Dieses Mittel kann aber vortheilhaft auch durch ein anderes ersetzt werden, das darin besteht, den Dampfcylinder mit einer Schichte von Kohlenstaub zu umgeben, die durch einen Mantel von Holz zusammengehalten wird.

Wenn die Temperatur des Cylinders einer Maschine nicht auf hinreichender Höhe gehalten wird, so folgt daraus ein Verlust an Dampf, der viel grösser ist, als man es auf den ersten Anblick glauben sollte. Es scheint in der That, dass nicht mehr Dampf verloren gehe, als derjenige, welcher sich condensirt, um dem Cylinder die Wärme wieder zu ersetzen, die er nach aussen ausstrahlt; aber wenn man etwas darüber nachdenkt, so findet man leicht, dass der Verlust an Dampf viel grösser ist. Wenn der Dampf aus dem Kessel in den Cylinder kommt, so condensirt er sich anfangs theilweise, um die Temperatur der Wände, mit welchen er in Berührung ist, zu erhöhen. Aber wenn er dann, nachdem er auf den Kolben gewirkt hat, in Verbindung mit dem Condensator gesetzt wird, so verliert er einen grossen Theil seiner Spannkraft und das Wasser, welches von der im Cylinder stattgefundenen Condensation herrührt, verdampft von Neuem, um sich mit jenem Dampf zu vermischen und sich mit ihm in den Condensator zu ergiessen. Diese Verdampfung, welche in dem Cylinder selbst stattfindet, erkältet die Wände desselben, und wenn

nun von Neuem Dampf aus dem Kessel herüber kommt, so findet der beschriebene Vorgang nochmals statt u. s. f. Man begreift daraus, wie wichtig es ist, die Erkältung des Cylinders durch Ausstrahlung zu verhindern, da sie die Hauptursache dieser auf einander folgenden Condensationen und Verdampfungen in seinem Innern ist.

Wenn die Röhre, welche den Dampf aus dem Kessel in die Maschine leitet, diesen Dampf in geringer Entfernung über der Oberfläche der siedenden Flüssigkeit entnimmt, so reisst derselbe stets Wasser mit sich fort, welches auf diese Weise bis in den Cylinder geführt wird. Dieses Wasser veranlasst einen bedeutenden Verlust, nicht blos weil die Wärme, welche zur Erhöhung seiner Temperatur verwendet wurde, keine Wirkung hervorbringt, sondern besonders desshalb, weil es in dem Cylinder, wie wir soeben auseinander gesetzt haben, später verdampft und dadurch eine bedeutende Erniedrigung der Temperatur der Wände desselben hervorbringt. Desshalb richtet man es so ein, dass der Dampf in solcher Weise aus dem Kessel entnommen wird, dass der eben beschriebene Uebelstand nicht stattfindet. Man erreicht dies nahezu, indem man oben über dem Kessel einen Raum, den sog. Dom anbringt, in welchem sich der Dampf ansammelt und von dessen obersten Theil das Dampfrohr ausgeht. Durch dieses Mittel fällt das in dem Dampf enthaltene Wasser allmählich in den Kessel zurück und der Dampf, welcher sich oben in dem Reservoir ansammelt, ist nahezu davon befreit.

Ein anderes Mittel, um den Uebelständen, welche aus der Anwendung nassen, d. h. Wasser mit sich führenden Dampfes entspringen, abzuhelfen, besteht darin, dass man den aus dem Kessel kommenden Dampf, bevor er in den Cylinder gelangt, durch einen Apparat leitet, wo er nochmals eigens erwärmt wird. Man hat es sogar vortheilhaft gefunden, den Dampf in diesem Apparat zu überhitzen (§. 456) und nennt desshalb letzteren den Ueberhitzer. Ein Rohr führt den Dampf aus dem Kessel in dieses meist cylindrisch gestaltete, langgestreckte Gefäss, in welchem er gewöhnlich noch mehrmals hin- und hergeleitet wird. Jenes Rohr ist mit einem Hahnen und mit einem Ventil versehen, das sich in der Richtung vom Kessel in den Ueberhitzer öffnet. Der Hahn dient dazu, den Apparat ganz abzusperren und ausser Gebrauch zu setzen. Das Ventil öffnet sich, wenn in Folge des Abströmens des Dampfes aus dem Ueberhitzer in den Cylinder die Spannkraft in jenem geringer werden will als im Kessel. — Gewöhnlich legt man den Ueberhitzer in die von der Kesselfeuerung abziehende heisse Luft.

§. 485. **Maschinen mit combinirten Dämpfen.** — Man benützt eigentlich bei den Dampfmaschinen nur einen sehr kleinen Theil der Wärme, welche zur Erzeugung des Dampfes verwendet wird. In der That sieht man, dass in dem Moment, wo der Dampf aufhört in dem Cylinder zu wirken und wo er entweder mit dem Condensator oder mit der freien Luft in Verbindung gesetzt wird, in demselben noch eine bedeutende Menge Wärme enthalten ist, deren grösster Theil sich in gebundenem Zustande befindet. Man kam nun auf die Idee, diese Wärme dadurch nutzbar zu machen, dass man sie zur Verdampfung einer leichter verflüchtigbaren Flüssigkeit als das Wasser anwendet und den aus dieser Flüssigkeit entwickelten Dampf zur Erzeugung einer neuen Quantität von Arbeit benützt. Als solche zweite Flüssigkeit hat man Aether, Schwefelkohlenstoff, Holzgeist, Alkohol, Chloroform u. s. w. zu nehmen versucht und ist endlich bei letzterer stehen geblieben.

Die Maschinen, welche nach dieser Idee construirt wurden, werden durch den Wasserdampf und durch den Dampf aus Chloroform zugleich in Bewegung gesetzt; man bezeichnet sie mit dem Namen Maschinen mit combinirten Dämpfen. Zwei von einander getrennte Kolben bewegen sich, jeder in einem Cylinder, und empfangen, der eine die Wirkung des Wasserdampfes, der andere diejenige des Dampfes aus Chloroform; diese beiden Kolben wirken gleichzeitig auf ein und dieselbe Welle, welche sie in Rotation versetzen. Wenn der Wasserdampf in dem Cylinder, welcher für ihn bestimmt ist, aufgehört hat, zu wirken, so strömt er in einen Raum, wo er sich in Berührung mit den Wänden eines besonderen Gefässes, welches das Chloroform enthält, condensirt. Diese Flüssigkeit verdampft dadurch und ihr Dampf, der eine hinreichende Spannkraft erhält, übt seine Wirkung in einem zweiten Cylinder aus, während in dem ersten eine neue Quantität Wasserdampf wirkt. Der Chloroformdampf endlich geht, nachdem er seine Wirkung ausgeübt hat, in einen Raum über, wo er, da dessen Wände fortwährend von aussen durch kaltes Wasser abgekühlt werden, condensirt wird.

Es leuchtet ein, dass die gleichzeitige Anwendung von Wasserdampf und des Dampfes einer leichter verflüchtigbaren Flüssigkeit eine grosse Ersparung von Brennmaterial herbeiführen sollte. Aber diese Ersparung ist von dem Verlust eines Theils der flüchtigen Flüssigkeit, welche man anwendet, begleitet, welchen Verlust man zwar ziemlich gering machen, aber niemals vollständig vermeiden kann und welcher von um so grösserer Wichtigkeit ist, je theuerer die angewandte Flüssigkeit zu stehen

kommt. Es scheint indessen doch, dass die Maschinen mit combinirten Dämpfen, welche man bis jetzt angewandt hat, aus dem Gesichtspunkt der Ersparung überhaupt gute Resultate gegeben haben.

§. 486. **Die calorische Maschine.** — Das Mittel, von welchem wir eben gesprochen haben, um einen Theil der Wärme, welche der Dampf besonders in gebundenem Zustande noch enthält, nachdem er schon aufgehört hat in einer Dampfmaschine zu wirken, wieder nutzbar zu machen, ersetzt den grossen Wärmeverlust, von welchem wir am Anfang des vorigen Paragraphen gesprochen haben, nur sehr unvollständig. Man hat sich desshalb nach anderen Mitteln umgesehen, diese Verluste zu vermeiden.

Für einen der besten Wege, dies zu erreichen, hat man schon seit langer Zeit den gehalten, den Wasserdampf durch erwärmte atmosphärische Luft zu ersetzen und dieser Gedanke ist es, der in den calorischen Maschinen verwirklicht werden soll. Wenn man die Spannkraft einer Luftmasse, die in einem geschlossenen Raume enthalten ist, durch Erhöhung ihrer Temperatur vergrössert, so kann man dieselbe in einer Maschine, die ähnlich wie die Dampfmaschinen eingerichtet ist, auf einen Kolben wirken lassen; allerdings muss sie hierauf, nachdem sie diese ihre Wirkung ausgeübt und den Kolben auf die andere Seite geschoben hat, mit der freien Luft in Verbindung gesetzt werden und behält dabei noch einen Theil der Wärme, welche ihr mitgetheilt worden ist. Aber diese verlorene Wärme ist hier ein viel geringerer Theil der verbrauchten Gesammtwärme als bei der Dampfmaschine und dies namentlich desshalb, weil bei der Erhitzung der Luft keine Wärme gebunden wird, wie das bei der Verdampfung des Wassers der Fall ist.

Aber alle Versuche, die erhitzte Luft zum Betrieb von Maschinen zu benützen, sind bisher hauptsächlich an der hohen Temperatur, welche man derselben geben muss und welche das Schmieren unmöglich macht, gescheitert. Doch haben die Anstrengungen, auf diesem Wege zu einer besseren Verwerthung des Brennmaterials zu gelangen, noch nicht aufgehört.

§. 487. **Dampfschiffe.** — Die erste Idee, den Dampf bei der Schifffahrt anzuwenden, rührt von *Papin* her. Er hat dieselbe in einem, im Jahre 1596 gedruckten Werke niedergelegt, in dem er ein Mittel angibt, die geradlinige hin- und hergehende Bewegung eines Kolbens in eine continuirliche Rotationsbewegung der Welle zu verwandeln, welche an ihren Enden sich drehende Ruder, Schaufelräder, trägt.

Im Jahre 1775 construirte *Périer* in Paris das erste Schiff, bei welchem versucht wurde, den Dampf als bewegende Kraft anzuwenden. Dieses Schiff hat indessen nur zu Versuchen gedient.

Im Jahre 1781 baute *Jouffroy* auf der Saone ein Schiff, welches wirklich einige Zeit hindurch im Gang war.

Aber das erste Schiff, welches nach den ersten Versuchen, die mit ihm angestellt wurden, in Benützung blieb, findet sich erst im Jahre 1807. Dieses Schiff wurde von *Fulton* in New-York gebaut und zur Beförderung von Reisenden sowohl als Waaren angewendet. Einige Jahre nachher wurde ein Schiff derselben Art in England in Thätigkeit gesetzt. Von dieser Zeit an aber machte die Dampfschifffahrt reissende Fortschritte und breitete sich bedeutend aus.

Die Einrichtung, welche man angenommen hat, um die Kraft des Dampfes zur Hervorbringung der Bewegung eines Schiffes zu verwenden, ist nach dem, was wir bisher über die Dampfmaschine gesagt haben, leicht zu verstehen. Es reicht in der That hin, die in §. 476 angegebenen Mittel anzuwenden, um die hin- und hergehende Bewegung des Kolbens einer Maschine in eine rotirende Bewegung der Welle zu verwandeln, welche an ihren beiden Enden die Schaufelräder trägt (§. 389); in ähnlicher Weise wird bei den Schraubenschiffen (§. 390) die Achse der Schraube durch die Dampfmaschine in Rotation gesetzt. Gewöhnlich wendet man zwei Dampfmaschinen zugleich an, die beide doppelt wirkend sind und welche eine und dieselbe Welle drehen. Die Kurbeln, mittelst welcher die beiden Kolben auf die Welle wirken, sei es nun direkt, sei es mit Hilfe von Bleuelstangen und selbst eines Balanciers, bilden einen rechten Winkel mit einander, sodass wenn die eine von ihnen horizontal steht, die andere vertikal ist und umgekehrt. Diese Einrichtung hat den Zweck, die Unregelmässigkeiten, welche bei der Uebertragung der Bewegung auf eine rotirende Welle mittelst einer Kurbel immer vorkommen, wenigstens zum grössten Theil zu beseitigen (§. 171). Wenn die eine der Kurbeln so steht, dass der Kolben, welcher ihr entspricht, nur wenig Wirkung ausüben kann, so befindet sich die andere im Gegentheil in solcher Stellung, wo der zweite Kolben seine volle Wirksamkeit ausübt.

§. 488. **Lokomotiven.** — Die Erfindung der Lokomotiven, deren man sich zur Fortbewegung der Wagenzüge auf den Eisenbahnen bedient, gehört der neuesten Zeit an. Indessen gehen die Versuche, welche angestellt wurden, um Wagen mittelst Dampf fortzubewegen, bis auf das Jahr 1769 zurück. Um diese

Zeit construirte ein französischer Ingenieur, *Cugnot*, einen Dampfwagen, der sich auf den gewöhnlichen Strassen fortbewegen sollte. Die Versuche mit diesem Wagen gelangen insoweit, als er durch den Dampf in der That in Bewegung gesetzt und mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 4 Kilometer in der Stunde fortbewegt wurde; aber diese Bewegung konnte nur kurze Zeit forterhalten werden, weil der Kessel nicht im Stande war, eine genügende Menge Dampf für den Consum der Maschine zu liefern.

Wir haben oben (§. 477) gesagt, dass ein Kessel nur dann in einer bestimmten Zeit eine gegebene Menge Dampf liefern kann, wenn die Heizfläche desselben eine hinreichende Grösse besitzt. Die Schwierigkeit, diese Bedingung bei einem Kessel, der durch den Wagen selbst getragen werden soll, zu befriedigen, trägt namentlich die Schuld, dass die verschiedenen Versuche, welche angestellt worden sind, um den Dampf zur Fortbewegung von Wägen zu benützen, lange Zeit hindurch ohne Erfolg blieben. Man konnte es nicht erreichen, der Heizfläche des Kessels eine Grösse zu geben, die im Verhältniss mit der grossen Menge des Dampfes steht, die der schnelle Gang einer Lokomotive erfordert. Erst im Jahre 1828 wurde dieses Problem auf die glücklichste Weise von *Séguin* gelöst. Die Form, welche derselbe für die Lokomotivkessel erfand, ist diejenige, welche man noch heute anwendet; wir werden sie bei der vollständigen Beschreibung einer Lokomotive kennen lernen.

Als eigentlicher Erfinder der Lokomotive, sowie überhaupt der ganzen Art und Weise des Fortschaffens der Lasten auf den Eisenbahnen, wie wir sie heute anwenden, muss aber *Stephenson* angesehen werden. Er wandte zuerst die gegenwärtig in Gebrauch stehenden glatten Schienen an, nachdem man immer der Meinung war, dass es unmöglich sei, die Lokomotive auf solchen fortzubewegen und namentlich in Frankreich vergebliche Versuche gemacht hatte, gezahnte Schienen anzuwenden. Ausserdem rührt die ganze Einrichtung der Lokomotiven, die in allen wesentlichen Theilen bis heute unverändert beibehalten worden ist, von diesem genialen englischen Ingenieur her.

§. 489. Die Figur 630 zeigt eine der Lokomotiven, wie sie auf der Eisenbahn von **Paris** nach **Rouen** angewendet werden; die Figur 631 gibt einen Längendurchschnitt derselben und die Figuren 632 und 633 sind Querschnitte, die an ihren beiden Enden gemacht sind.

Zwei Cylinder A (Fig. 630) befinden sich, einer auf jeder Seite, vorn an der Lokomotive. Diese beiden Cylinder sind hier

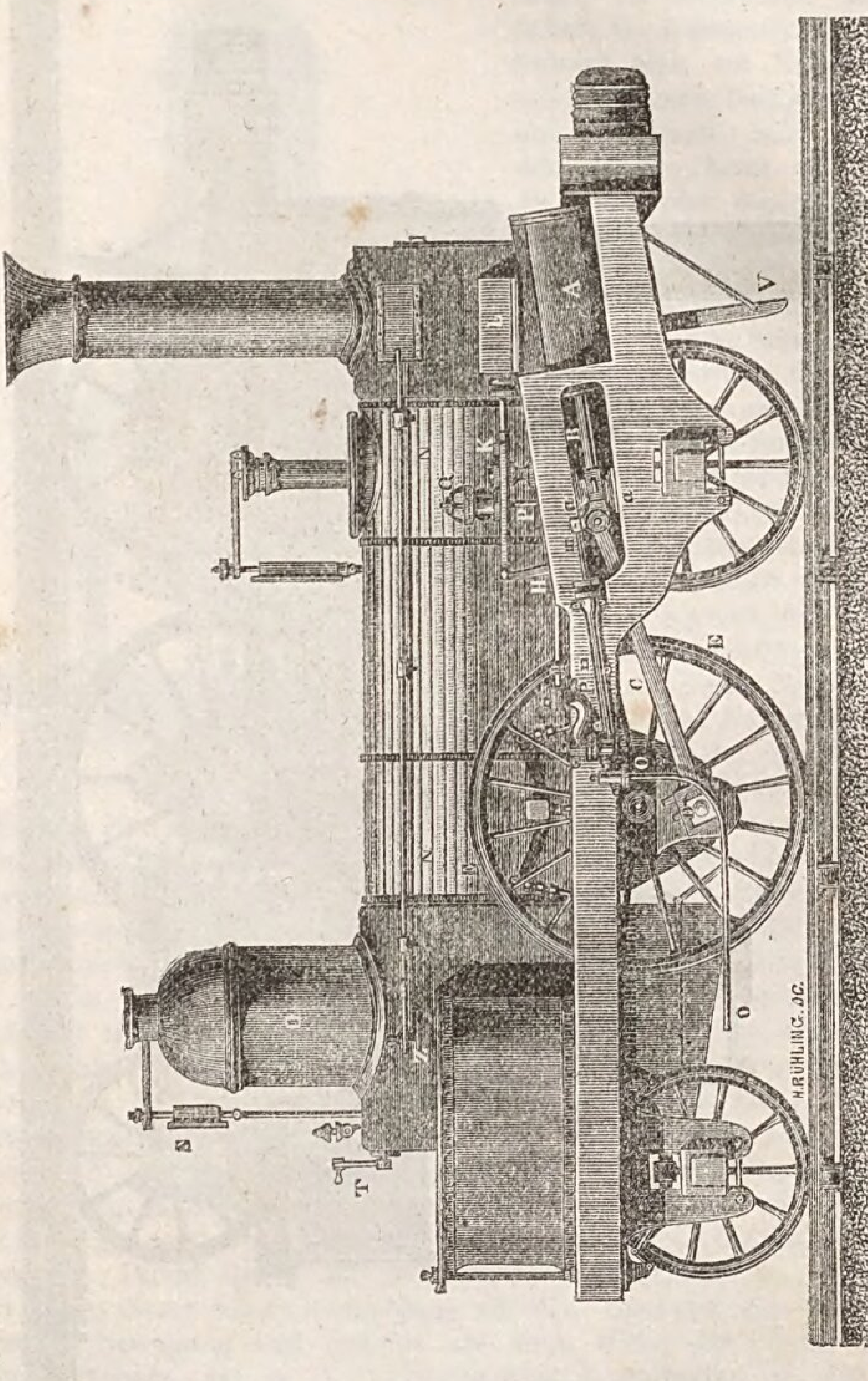


Fig. 630

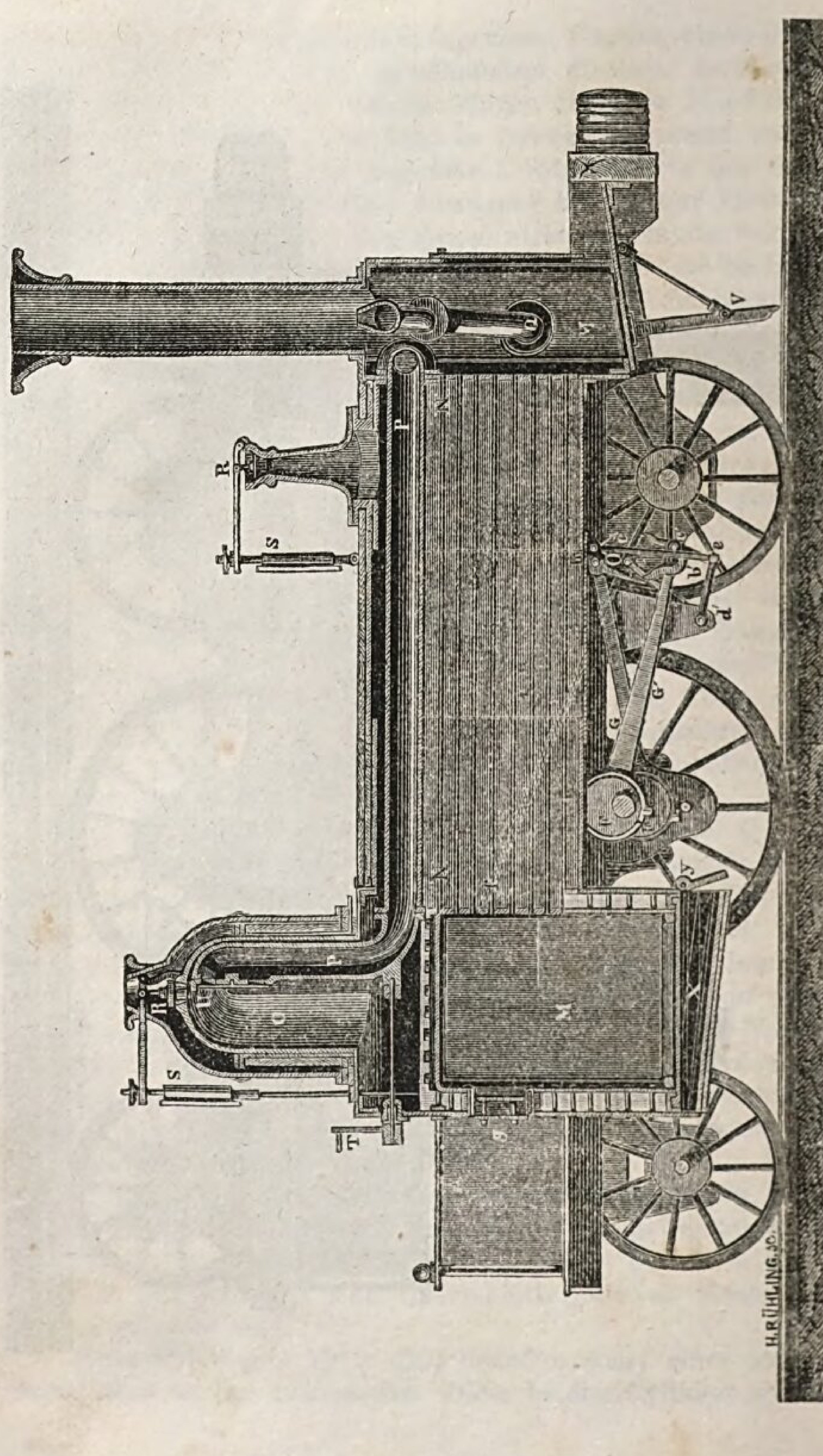


Fig. 631.

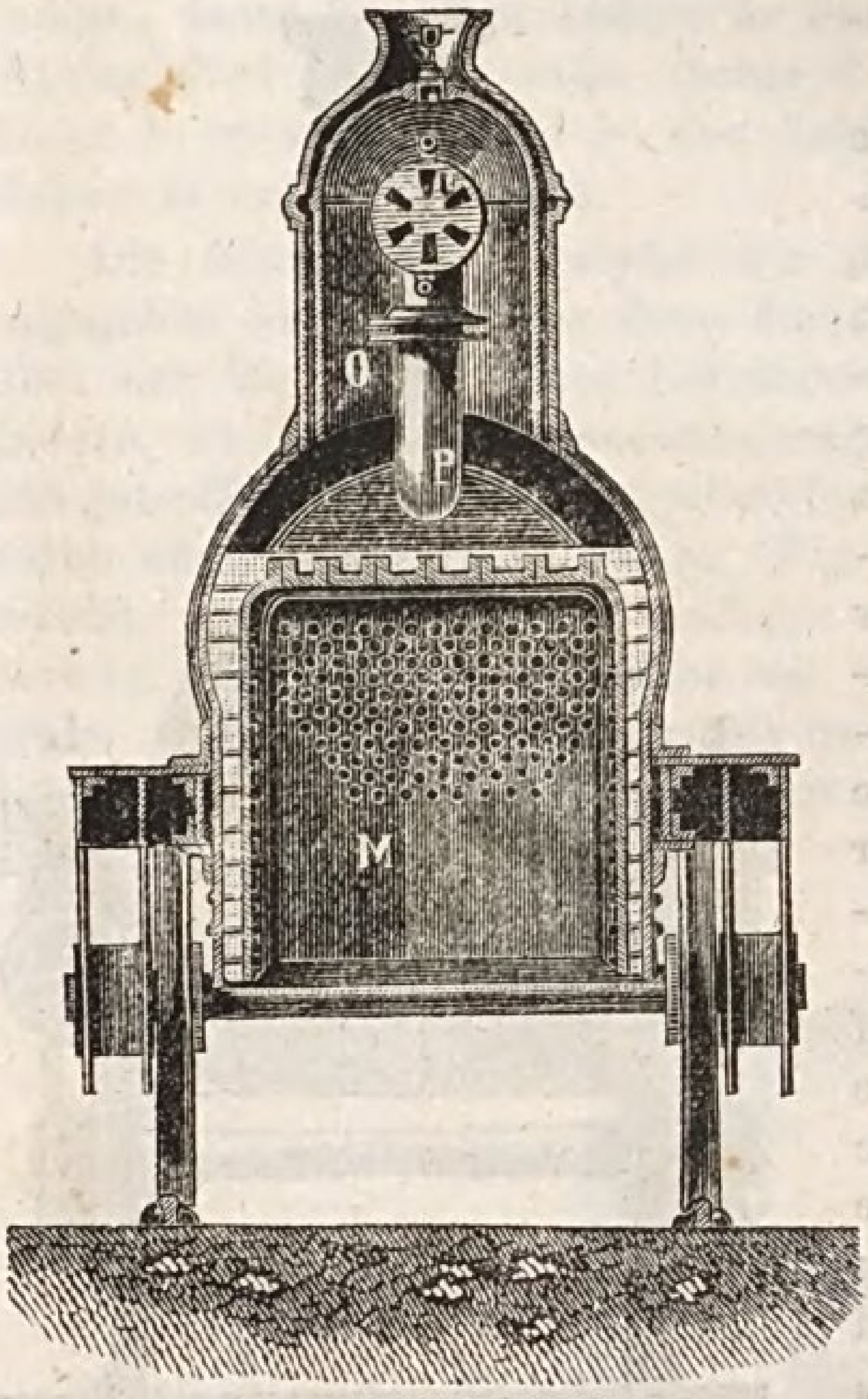


Fig. 632.

etwas geneigt, häufig aber liegen sie horizontal. In jedem der beiden Cylinder bewegt sich ein Kolben, auf welchen der Dampf bald auf der einen, bald auf der andern Seite wirkt. Es sind also eigentlich, wie bei den Dampfschiffen (§. 487), zwei doppelt wirkende Dampfmaschinen vorhanden. Die Stange B jedes Kolbens wird bei ihrer Bewegung durch zwei feststehende Schleifschienen *aa* geleitet. Diese Stange ist mittelst eines Gelenkes mit der sog. Flügelstange C verbunden, welche einen Zapfen D ergreift, der an einem der Treibräder befestigt ist. Dieser Zapfen, der in einiger Entfernung vom Mittelpunkt des Rades liegt, wirkt wie eine Kurbel. Man begreift hieraus, dass durch die hin- und hergehende Bewegung des Kolbens die Rotationsbewegung der Treibräder hervorgebracht wird. Die beiden Kurbeln, auf welche die beiden Kolben wirken, bilden ausserdem wie bei den Dampfschiffen und aus demselben Grunde wie dort einen rechten Winkel mit einander.

Die Vertheilung des Dampfes in den Cylindern geschieht mittelst Schieber, gewöhnlich mittelst *Clapeyron*'scher Expansionsschieber (§. 471), welche von Kreisexcentern bewegt werden, die an der Achse der Treibräder angebracht sind. Der Steuermechanismus ist theilweise in Fig. 631 sichtbar. Das Excenter F gibt der Excenterstange G eine hin- und hergehende Bewegung. Diese Excenterstange endigt sich bei *b* in eine Gabel, Klaue genannt, welche das untere Ende eines Hebels H (Fig. 630) ergreift. Dieser Hebel, der um seine Mitte beweglich ist, erhält in Folge dieser seiner Verbindung mit dem Excenter eine oscillirende Bewegung und ertheilt auf diese Weise der Stange K des Schiebers, der in der Dampfkammer L enthalten ist, eine

hin- und hergehende Bewegung.

Da sich eine Lokomotive ebenso gut vor- als rückwärts bewegen können muss, so ist es nothwendig, dass es der Führer in seiner Gewalt hat, die Vertheilung des Dampfes so ändern zu können, dass sich die Maschine in dem einen oder in dem andern Sinne bewegt. Es ist leicht einzusehen, was zu diesem Zwecke erforderlich ist. Wenn einer der beiden Kolben sich inmitten seines Hubes befindet, so muss der Dampf auf seine vordere oder auf seine hintere Fläche wirken, je nachdem sich die Lokomotive in dem einen oder in dem andern Sinne bewegt. In dem einen dieser beiden Fälle muss sich der Schieber an dem einen Ende der Dampfkammer, in dem andern am entgegengesetzten derselben befinden.

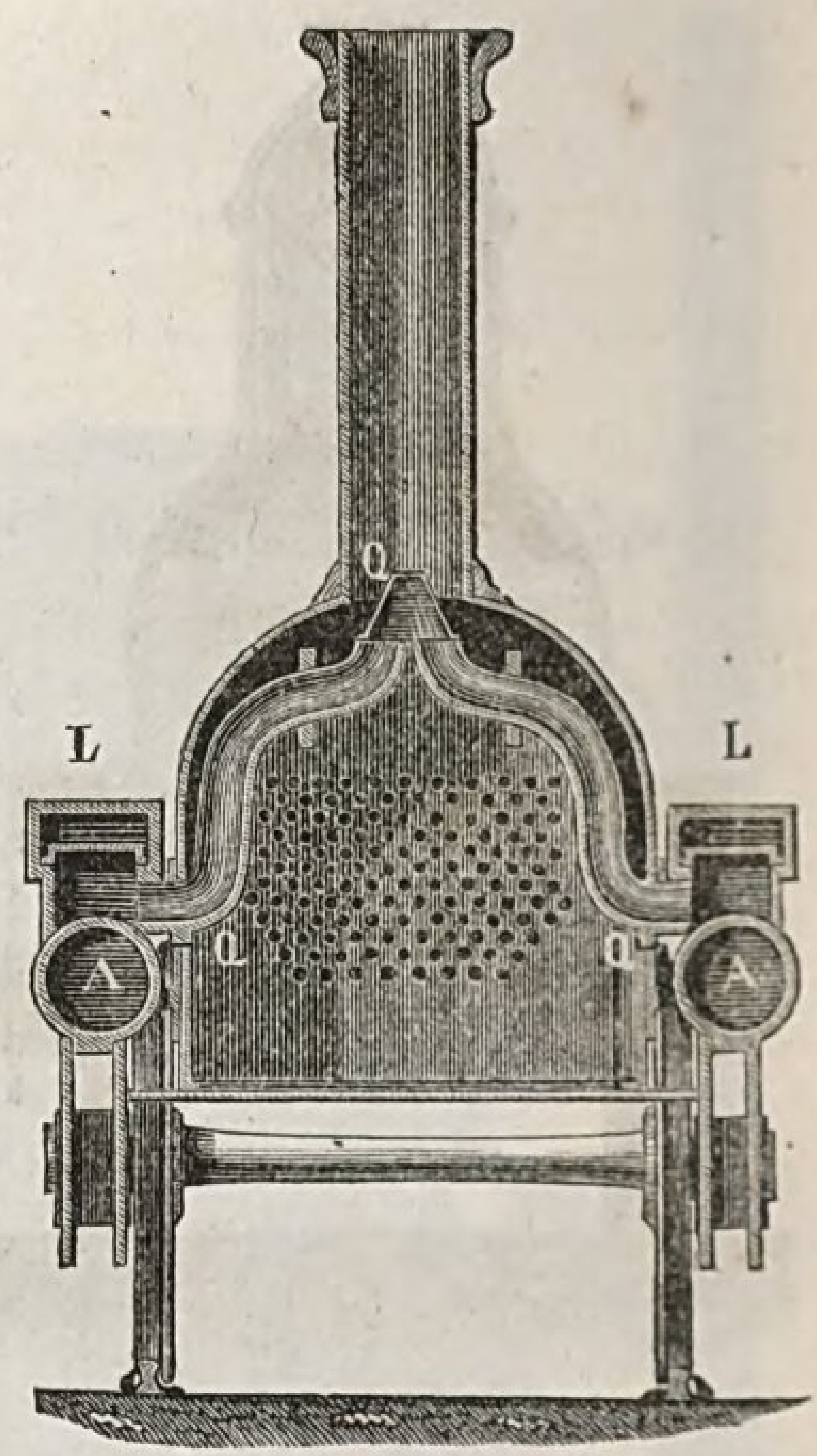


Fig. 633.

Man sieht also, dass es, um den Sinn der Bewegung der Maschine zu ändern, hinreicht, den Schieber durch ein zweites Excenter (das Rückwärts-Excenter) führen zu lassen, welches in gerade entgegengesetzter Weise als das erste auf der Achse der Treibräder angebracht ist. Aus diesem Grunde trägt diese Achse zwei Excenter F, F′, von denen jedes den Schieber in Bewegung setzen kann. Die Stangen G, G′, welche durch diese Excenter bewegt werden, endigen sich in zwei Klauen *b*, *b*′, deren Oeffnungen nach entgegengesetzter Richtung gekehrt sind; von denselben ergreift bald die eine, bald die andere den am unteren Ende des vertikalen Hebels H angebrachten Zapfen. Ein Winkelhebel *cde*, der um den Punkt *d* beweglich ist, dient dazu, mittelst der beiden Stäbe *ec*, *ec*′, welche von dem Punkte *e* ausgehen, die Klauen *b*, *b*′ in passender Höhe zu erhalten. Mit Hilfe einer langen Stange *f*, die sich oben im Bereich der Hände des Führers

endigt, kann derselbe, indem er daran zieht oder drückt, den Winkelhebel *cde* um seine Achse *d* drehen und dadurch die Klaue *b* oder die Klaue *b'* den Zapfen am unteren Ende des Hebels H ergreifen lassen.

Die Einrichtung, welche wir soeben angegeben haben und die dazu dient, den Sinn der Bewegung einer Lokomotive zu ändern, ist diejenige, welche man ursprünglich getroffen hatte. Sie wird jetzt allgemein durch eine andere Einrichtung (Fig. 634) ersetzt, die nichts als eine einfache Abänderung der ersteren ist, aber vor dieser grosse Vortheile besitzt. Anstatt dass die beiden Excenterstangen G, G' an ihren

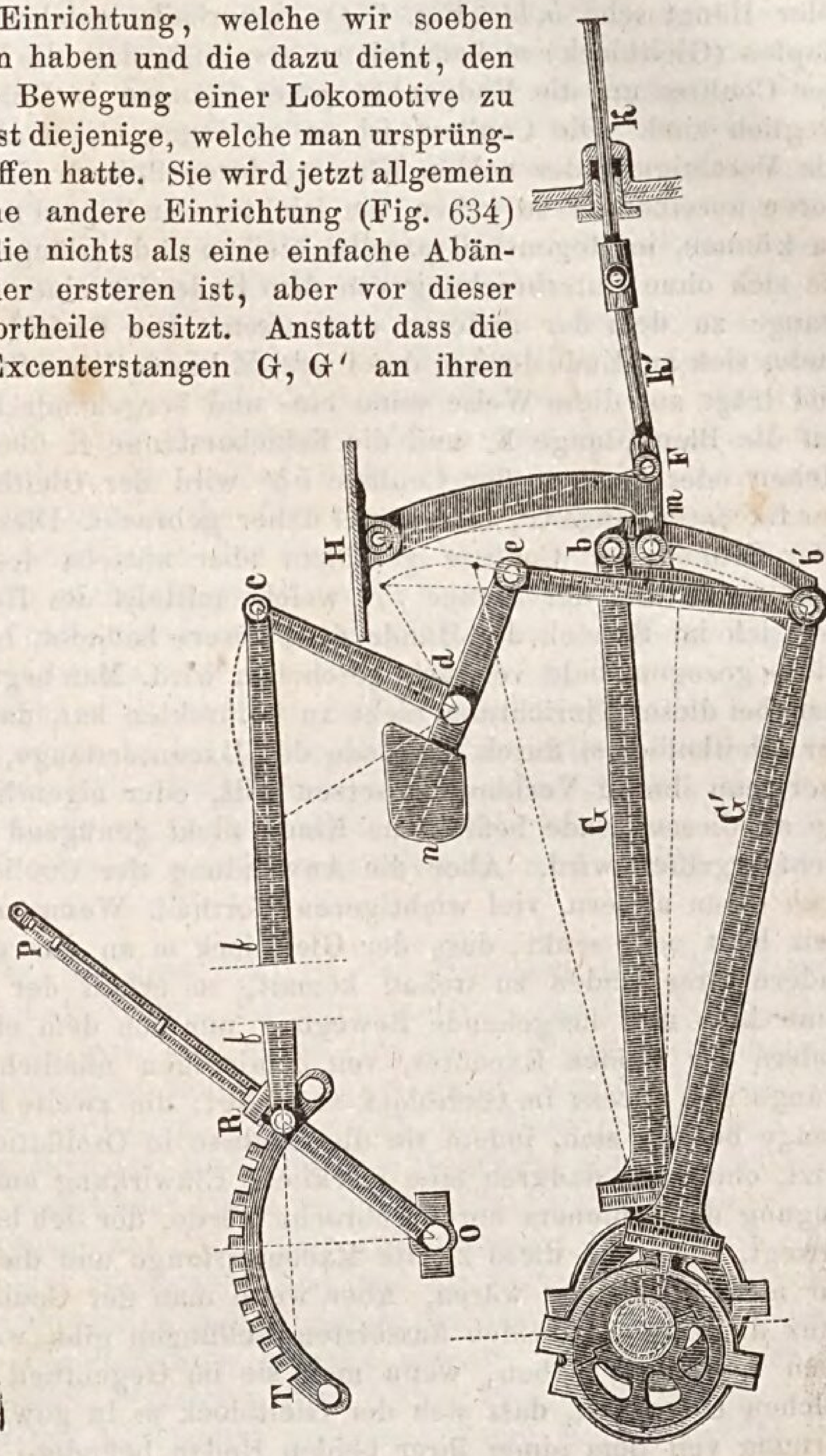


Fig. 634.

Enden zwei Klauen b, b' (Fig. 631) tragen, von denen die eine oder die andere den Zapfen, durch welchen die hin- und hergehende Bewegung auf den Schieber übertragen wird, ergreift, hat man die Enden dieser Stangen durch die sog. Coulisse oder Hängtasche b, b' (Fig. 634), innerhalb welcher sich der Zapfen (Gleitblock) m befindet, so vereinigt, dass die Endpunkte der Coulisse um die Endpunkte jener Stangen in Gelenken beweglich sind. Die Coulisse ist so zu sagen nichts anderes als die Vereinigung der beiden Klauen, deren Spitzen sich, anstatt vorne auseinander zu gehen, um leichter den Zapfen m ergreifen zu können, im Gegentheil parallel bleiben und verlängern, sodass sie sich ohne Unterbrechung von dem Ende der einen Excenterstange zu dem der anderen erstrecken. Der Gleitblock m befindet sich am Ende des um den Punkt H beweglichen Stückes F H und trägt auf diese Weise seine hin- und hergehende Bewegung auf die Bleuelstange K' und die Schieberstange K über. Durch Heben oder Senken der Coulisse $b b'$ wird der Gleitblock bald der Excenterstange G', bald der G näher gebracht. Dieses Heben oder Senken der Coulisse geschieht aber mittelst des Winkelhebels $c d e$ und der Stange $f f$, welche mittelst des Hebels O P der sich im Bereich der Hände des Führers befindet, bald rückwärts gezogen, bald vorwärts geschoben wird. Man begreift, dass man bei dieser Einrichtung nicht zu befürchten hat, dass einmal der Gleitkolben m durch das Ende der Excenterstange, mit welcher man ihn in Verbindung setzen will, oder eigentlich durch die an diesem Ende befindliche Klaue nicht genügend oder gar nicht ergriffen wird. Aber die Anwendung der Coulisse bietet noch einen andern, viel wichtigeren Vortheil. Wenn man sie so weit hebt oder senkt, dass der Gleitblock m an das eine oder andere ihrer Enden zu stehen kommt, so erhält der Schieber seine hin- und hergehende Bewegung nur von dem einen oder andern der beiden Excenter, von demjenigen nämlich, dessen Stange sich direkt im Gleitblock m endigt; die zweite Excenterstange bewegt sich, indem sie die Coulisse in Oscillationen versetzt, ohne dass dadurch eine merkliche Einwirkung auf die Bewegung des Schiebers hervorgebracht würde, der sich beinahe so bewegt, als wenn diese zweite Excenterstange und die Coulisse gar nicht vorhanden wären. Aber wenn man der Coulisse nicht ganz die eine der beiden äussersten Stellungen gibt, welche wir eben betrachtet haben, wenn man sie im Gegentheil in einer solchen Höhe hält, dass sich der Gleitblock m in gewisser Entfernung von dem einen ihrer beiden Enden befindet, so erhält

er und mit ihm der Schieber eine hin- und hergehende Bewegung, welche nicht blos durch ein einziges der beiden Excenter hervorgebracht wird; die Coulisse, indem sie unter der gleichzeitigen Wirkung der beiden Excenterstangen G, G' oscillirt, ertheilt dem Gleitblock *m* eine andere Bewegung, als wenn er sich unter der Wirkung einer einzigen dieser Excenterstangen bewegen würde. Nun hat man erkannt, dass der Dampf auf diese Weise mit einem verschiedenen Grad von Expansion wirkt, je nachdem der Gleitblock *m* in dieser oder jener Stellung in Bezug auf die Enden der Coulisse ist; die Anwendung dieser Coulisse gestattet also, die Expansion des Dampfes nach Belieben abzuändern, auch während die Maschine im Gang ist, und dies ist ein sehr wichtiges Resultat (§. 473). Der Gleitblock *m* muss sich in der einen oder andern der beiden Hälften der Coulisse befinden, je nachdem sich die Lokomotive vor- oder rückwärts bewegen soll. Der Grad der Expansion wird in dem einen wie in dem andern der beiden Fälle abgeändert und zwar vergrössert, indem man die Coulisse mittelst des Hebels OP soweit hebt oder senkt, dass der Gleitblock mehr gegen die Mitte der Coulisse hin rückt. In jeder der ihr einmal gegebenen Stellungen wird die Coulisse dadurch festgehalten, dass ein Vorsprung des Hebels OP in eine der Kerben des Sectors TR eingreift. Das Gegengewicht *n* gehört dazu, das Gewicht der Coulisse und der Excenterstangen zu balanciren, damit diese Stücke leicht in der gewünschten Höhe festgehalten werden können. Die Coulisse, deren Vortheile wir soeben kennen gelernt haben, ist eine Erfindung *Stephenson's* und heisst desshalb auch gewöhnlich die *Stephenson*'sche Coulisse.

M (Fig. 631 und 632) ist der Heizraum oder die Feuerbuchs der Lokomotive. Das Brennmaterial, das aus Kohlen, Torf oder Koks besteht, wird durch eine kleine Thüre *g* eingebracht. Die Feuerbuchs ist von allen Seiten durch doppelte Wände eingeschlossen, zwischen welchen sich ein Theil des Wassers aus dem Kessel befindet; ihre Decke ist gleichfalls mit einer Schichte Wasser von gewisser Höhe bedeckt. Die Flamme streicht von der Feuerbuchs aus durch eine grosse Anzahl von Röhren, die nebeneinander angebracht sind und im Sinne der Längenrichtung der Lokomotive mitten durch den Kessel hindurch gehen. Zwischen diesen Röhren befindet sich der grösste Theil des zu verdampfenden Wassers. Die Verbrennungsgase gelangen in einen, vor der Lokomotive gelegenen Raum M', die Rauchkam-

mer, und entweichen durch den Kamin, welcher sich über diesem Raume befindet.

Die Figur 632, welche einen Querschnitt durch die Feuerbuchs darstellt, zeigt die Enden jener Röhren, deren Anzahl 100—200 beträgt; ihr Durchmesser ist 4—5 Centimeter. In Folge dieser Einrichtung kann die Heizfläche eine Grösse von über 100 Quadratmeter erreichen; und dadurch allein ist es möglich eine so grosse Menge Dampf zu erzeugen, wie sie zu einem schnellen Gang der Lokomotive erforderlich ist.

Der eigentliche Körper des Kessels besteht hauptsächlich aus einem horizontalen Cylinder, der sog. Kanone N N (Figg. 630 u. 631), innerhalb deren die zahlreichen Röhren, von denen wir eben gesprochen haben, angebracht sind. Unmittelbar über der Feuerbuchs M befindet sich ein Dampfreservoir O. Eine weite Röhre PP, welche oben von diesem Reservoir ausgeht, durchdringt den Kessel seiner ganzen Länge nach und erstreckt sich bis an das vordere Ende der Lokomotive, wo sie sich in zwei Arme theilt, um den Dampf in die beiden Cylinder zu leiten. Wenn der Dampf aufgehört hat auf den Kolben zu wirken, so entweicht er durch zwei Röhren Q, deren Anordnung aus Fig. 633, welche ein Querdurchschnitt durch den vorderen Theil der Lokomotive ist, ersichtlich wird. Diese beiden Röhren vereinigen sich an ihren beiden Enden und münden unten in den Kamin; in Folge dessen bläst der Dampf, nachdem er die Cylinder verlassen hat, in der Richtung der Achse des Kamins aus und macht dadurch den Zug in diesem Kamin und in Folge dessen die Verbrennung in der Feuerbuchs lebhafter.

Auf dem Kessel sind zwei Sicherheitsventile R (Fig. 631) angebracht, die den Zweck haben zu verhindern, dass die Spannung des Dampfes die Grenze, für welche der Kessel construirt ist, überschreitet. Die Hebel, welche auf diese Ventile drücken, sind gewöhnlich nicht, wie bei den stehenden Maschinen, durch Gewichte belastet, wenigstens das hintere nicht, weil die Erschütterungen, welche die Bewegung der Lokomotive stets begleiten, die Wirkung dieser Gewichte stören würde. Anstatt dessen ist das Ende dieses Hebels einer Zugkraft ausgesetzt, welche durch eine, in der Büchse S enthaltene Schraubenfeder hervorgebracht wird; die Grösse dieser Zugkraft kann dadurch regulirt werden, dass man eine Schraubenmutter, welche an dem von der Feder ausgehenden Stab angebracht ist und über dem Hebel des Ventils liegt, hinauf- oder hinabschraubt.

Der Hebel T (Figg. 630 u. 631), welcher sich im Bereich der Hände des Führers befindet, dient dazu, die Mündung U der Röhre P zu öffnen und zu schliessen. Wenn die Lokomotive stillsteht, so reicht es hin diesen Hebel zu drehen, damit der Dampf, indem er in die Röhre P und in Folge dessen in die Cylinder eindringt, auf die Kolben drückt und die Maschine in Bewegung setzt. Wenn man die Wirkung des Dampfes beendigen will, so dreht man diesen Hebel in entgegengesetztem Sinne und die Maschine setzt ihre Bewegung nur noch in Folge der bereits gewonnenen Geschwindigkeit fort; in diesem Falle bewegen sich die Kolben in Folge ihrer Verbindung mit den Treibrädern fortwährend in den Cylindern, aber sie üben auf den Gang der Lokomotive keine Wirkung als höchstens den Widerstand aus, der aus der Reibung entspringt, welche durch ihre Bewegung entwickelt wird. Man nennt die eben beschriebene Vorrichtung den Regulator, weil damit die Mündung des Einströmungsrohrs nicht blos ganz geöffnet oder geschlossen, sondern auch mehr oder weniger eröffnet werden und dadurch ein schnellerer oder langsamerer Gang der Maschine erzielt werden kann.

Das Stück V, welches man vor der Lokomotive angebracht sieht (Fig. 630 und 631) dient dazu, die Schienen von Hindernissen zu räumen, welche sich zufällig darauf befinden können und durch welche ein Entgleisen der Maschine hervorgebracht werden könnte. Dieses Stück trägt desshalb auch den Namen Schienenräumer.

Ein besonderer Wagen, Tender genannt, folgt unmittelbar der Lokomotive und dient ihr als Reservoir für Wasser und Brennmaterial. Aus diesem Tender wird das Wasser zeitweise durch die Speisepumpen der Maschine in den Kessel geschafft, um den Wasserstand in demselben in constanter Höhe zu erhalten. Jeder Treibkolben der Lokomotive bewegt eine Speisepumpe, deren Einrichtung aus Fig. 630 zu ersehen ist. Die Kolbenstange *m* dieser Pumpe ist mit dem Ende der Stange des Treibkolbens verbunden. Die hin- und hergehende Bewegung des letzteren Kolbens bringt also eine ähnliche Bewegung des ersteren in dem kleinen Pumpenstiefel *n* hervor. Das Wasser des Tenders wird auf diese Weise durch die Röhre *o* aufgesaugt und hierauf in die Röhre *p* gedrückt, welche es in den Kessel führt. In diesen beiden Röhren sind zu beiden Seiten des Pumpenstiefels *n* Ventile so angebracht, dass sie die Bewegung des Wassers in dem Sinne, welchen wir eben angegeben haben, gestatten, im entgegengesetzten aber verhindern.

§. 490. **Lokomobilen.** — Man nennt Lokomobile eine Dampfmaschine, welche dazu bestimmt ist, wie eine stehende Maschine zu wirken, die aber auf Räder gestellt wurde, mittelst deren sie leicht von einem Ort zum anderen geschafft werden kann. Der Gebrauch der Lokomobilen verbreitet sich seit einigen Jahren, besonders für gewisse landwirthschaftliche Arbeiten, mehr und mehr. Die Fig. 635 zeigt eine Maschine dieser Art, welche in den Werkstätten von *Calla* gebaut wurde.

Damit die Maschine und ihr Kessel leicht von einem Ort zum anderen transportirt werden können, ist es nothwendig, dass sie möglichst wenig Raum einnehmen. Desshalb hat man, wie aus der Figur ersichtlich ist, dieselbe Einrichtung getroffen, wie bei den Lokomotiven. Eine Lokomobile unterscheidet sich daher von einer Lokomotive nur dadurch, dass die hin- und hergehende Bewegung des Kolbens, welcher der Wirkung des Dampfes ausgesetzt ist, nicht zur Rotationsbewegung der Räder, welche die Maschine tragen, angewendet wird; der Cylinder, in welchem sich der Kolben bewegt, kann also eine andere Stellung erhalten. A ist dieser Cylinder; das Ende B der Kolben-

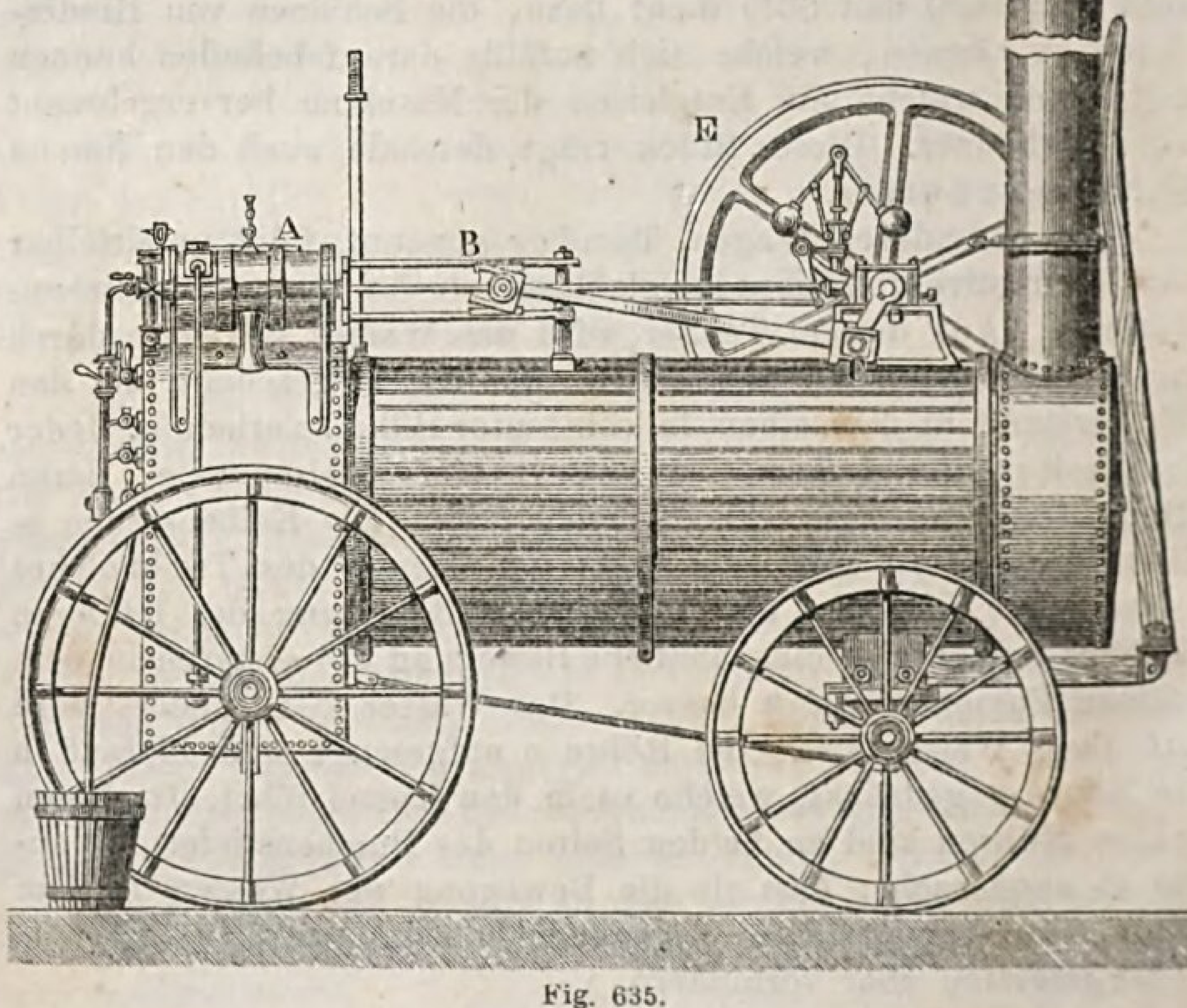


Fig. 635.

stange ist mittelst eines Gelenkes mit einer Kurbelstange BC verbunden und diese Kurbelstange ergreift den Zapfen einer Kurbel CD, die an einer horizontalen Welle D angebracht ist. Die hin- und hergehende Bewegung des Kolbens in dem Cylinder A bringt also eine drehende Bewegung der Welle D hervor. Ein Schwungrad E, das auf dieser Welle befestigt ist, dient zur Regulirung der Bewegung; über den Umfang dieses Schwungrads geht ein Riemen ohne Ende, mittelst dessen die Bewegung auf irgend eine andere Maschine übertragen werden kann.

Die Maschine ist mit zwei Deichseln versehen, welche man rechts in Fig. 635 sieht, wo sie in die Höhe gehoben und an den Kamin angelehnt sind. Wenn man die Lokomobile an einen anderen Ort transportiren will, so spannt man ein Pferd daran, welches sie wie einen gewöhnlichen Wagen fortzieht. Wenn sie aber auf diese Weise an die Stelle gebracht ist, wo man sich ihrer bedienen will, so muss man die Räder gut festmachen, damit sie sich während des Ganges der Maschine nicht bewegen können.

§. 491. **Giffard's Dampfstrahlpumpe.** — Aehnlich wie in dem Wassertrommelgebläse (§. 448) das Wasser, so kann auch der Dampf dazu benützt werden, direkt eine Nutzarbeit zu leisten, ohne dass seine Wirkung erst durch Vermittlung einer Kraftmaschine übertragen werden müsste. Diese Idee liegt der *Giffard*'schen Dampfstrahlpumpe (auch Injecteur genannt) zu Grunde, die namentlich dazu benützt wird, die Kessel von Dampfmaschinen mit dem nöthigen Wasser zu speisen. Die Fig. 636 stellt diesen Apparat dar, welcher nach dem, was wir oben (§. 404) unter Pumpen verstanden wissen wollten, eigentlich mit Unrecht den Namen Pumpe führt. Die Röhre A führt den Dampf aus dem Dampfkessel unter dem in letzterem herrschenden Drucke nach der in Rede stehenden Vorrichtung. Aus der Röhre A gelangt der Dampf zunächst durch eine Anzahl von Löcher in die Röhre BC, aus welcher er an dem Ende C, wo sie in ein konisches Mundstück zuläuft, in die Kammer D ausströmt. Durch dieses Ausströmen wird das Speisewasser in der Saugröhre F, die gleichfalls in die Kammer D mündet, aufgesaugt und indem der Dampf mit diesem kalten Wasser in Berührung tritt, wird er condensirt. Das aus dieser Condensation hervorgehende, sowie auch das aufgesaugte Wasser treten nun mit grosser Geschwindigkeit durch das Mundstück E aus, und der so gebildete Strahl wird durch ein zweites Mundstück R aufgefangen, von welchem aus das gesammte Wasser über K durch die Röhre L in den Kessel oder überhaupt in den Raum

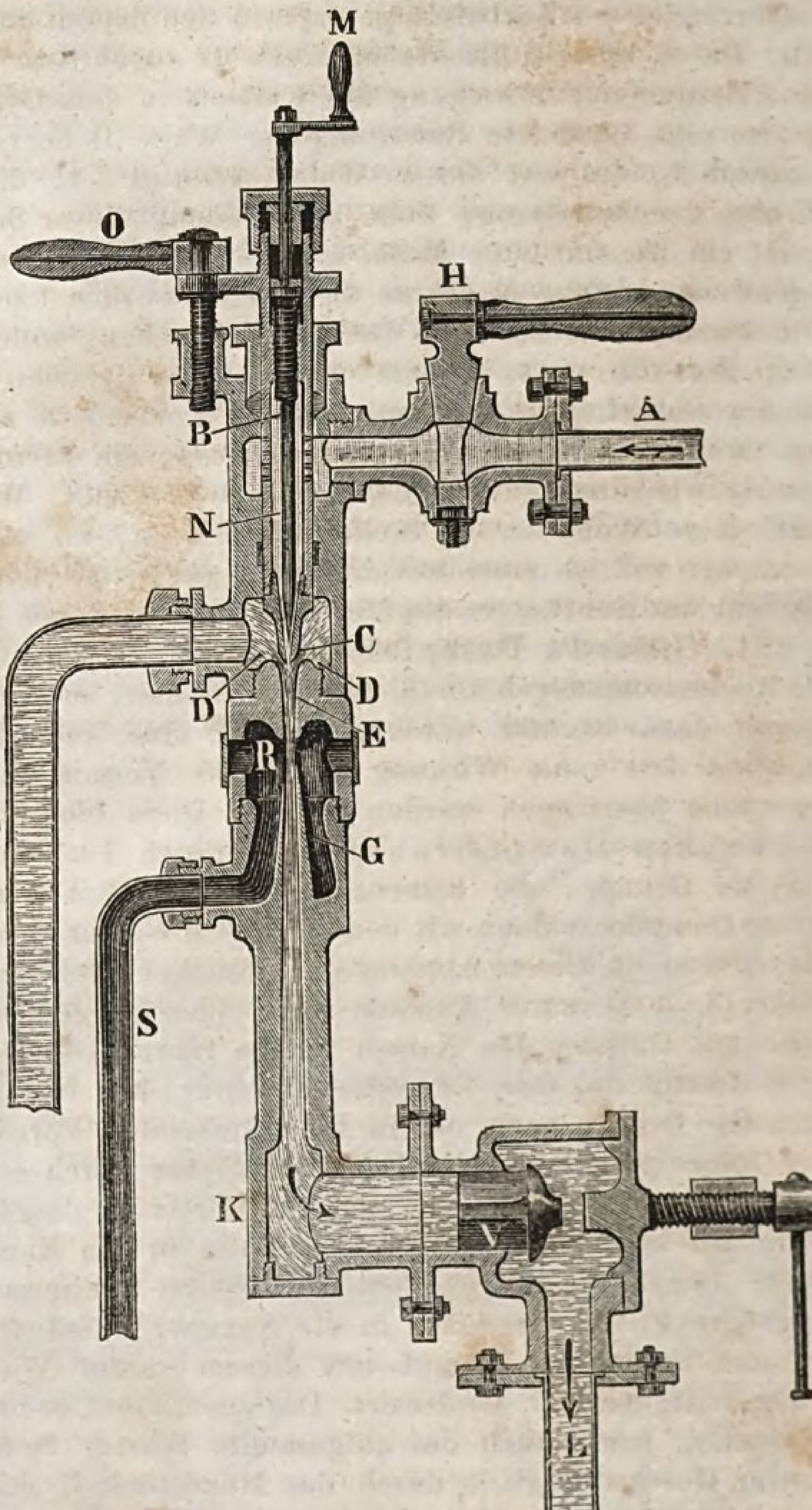


Fig. 636.

gelangt, in welchen es gefördert werden soll. Das Ventil V hat den Zweck, den Rücktritt des Wassers aus dem Kessel zu verhüten. Das überschüssige Wasser, welches nicht von dem Mundstück R aufgefangen wird, sammelt sich in der Kammer G und fliesst von da durch die Röhre S ab.

Durch Umdrehung der Kurbel M kann der Dorn N hinauf oder herabgeschraubt und dadurch der Dampfzufluss in die Kammer D regulirt werden. Mittelst der Kurbel O (eigentlich eine sog. Ratsche) kann man die ganze Röhre BC heben und senken und dadurch die Menge des aus der Röhre F gesaugten Speisewassers vergrössern oder verkleinern. Mittelst des Hahnes H kann der Dampf ganz abgesperrt werden. Um den Apparat in Gang zu bringen, lüftet man, nachdem man den Wasserregulator BC in die gehörige Stellung gebracht hat, den Dorn N etwas, sodass ein schwacher Dampfstrahl entweicht, welcher, die Luft mit sich fortreissend, einen luftverdünnten Raum über dem Wasserspiegel in der Röhre F erzeugt und somit das Saugen veranlasst. Sobald das gesaugte Wasser bis zur Dampfmündung C gestiegen ist, wird letztere durch rasches Umdrehen der Kurbel M gänzlich frei gemacht und nun ferner unberührt gelassen. Bei gutem Gange soll beim Ausfluss aus der Mündung E weder Wasser seitwärts spritzen und unten bei S ablaufen, noch soll Dampf den freien Strahl umwölken. Man beobachtet die Beschaffenheit des Strahls durch Durchsichten, welche man in der Kammer G oben angebracht sieht. Da der aus der Mündung C strömende Dampf immer vollständig condensirt werden muss, so hängt die richtige Stellung des Wasserregulators von dem Drucke und von der Menge des bei C ausströmenden Dampfes ab; es müssen also der Wasserregulator BC sowohl, als der Dorn N mittelst der Kurbeln O und M solche Stellungen erhalten, dass der bei E ausfliessende Wasserstrahl die oben angegebene Beschaffenheit hat.

Es leuchtet sogleich ein, dass ein Hauptvorzug des beschriebenen Apparates darin bestehen muss, dass die gesammte Wärme des zu seinem Betrieb verwendeten Dampfes, die gebundene sowohl wie die freie, vollständig ausgenützt wird, indem sie die Temperatur des durch den Apparat gelieferten Wassers erhöht. Natürlich aber kommt dieser Vortheil nur da in Betracht, wo dieses Wasser eine höhere Temperatur erhalten soll, wie dies in der That der Fall ist, wenn der Apparat als Speisevorrichtung für Dampfkessel benützt wird. Wo es dagegen gleichgiltig ist, welche Temperatur das durch den Apparat geförderte Wasser hat, da ist der Nutzeffekt der *Giffard*'schen Dampfstrahlpumpe

nur ein geringer und eine andere gewöhnliche Pumpe bei weitem vorzuziehen. Ferner ist klar, dass die Wirksamkeit des Apparats wesentlich von der Temperatur des durch die Röhre F eingesaugten Wassers abhängig ist. Je niedriger diese Temperatur ist, desto rascher erfolgt die Condensation des Dampfes in der Kammer D und desto wirksamer muss also der Apparat sein. Daraus ist zu erklären, dass man an solchen Dampfkesseln, für welche kaltes Wasser zum Speisen verwendet wird, gute Resultate mit der *Giffard*'schen Speisevorrichtung erhalten hat, geringe dagegen an Dampfkesseln, die mit Vorwärmern versehen sind, bei denen also das Wasser schon mit ziemlich hoher Temperatur in den Apparat kommt.

Tabelle I. Vergleichung einiger Längenfusse unter einander und mit dem Meter.

Meter.	Bayern, Fuss.	Preussen, Dänemark, rheinl. Fuss.	Oesterreich, Wiener Fuss.	Württemberg, Hamburg, Fuss.	Baden, Schweiz, Fuss.	Hannover, Fuss.	Sachsen, Fuss.	England, Russland, Fuss.	Pariser Fuss.
1	3,42631	3,18620	3,16345	3,49052	3,33333	3,42355	3,53120	3,28090	3,07844
0,29186	1	0,92992	0,92328	1,01874	0,97286	0,99919	1,03061	0,95756	0,89847
0,31385	1,07536	1	0,99286	1,09551	1,04618	1,07449	1,10828	1,02972	0,96618
0,31611	1,08309	1,00719	1	1,10339	1,05370	1,08222	1,11625	1,03713	0,97313
0,28649	0,98160	0,91282	0,90630	1	0,95497	0,98081	1,01165	0,93995	0,88194
0,30000	1,02789	0,95586	0,94903	1,04716	1	1,02706	1,05936	0,98427	0,92353
0,29209	1,00081	0,93067	0,92403	1,01956	0,97364	1	1,03144	0,95833	0,89920
0,28319	0,97030	0,90230	0,89586	0,98848	0,94397	0,96951	1	0,92912	0,87178
0,30479	1,04432	0,97114	0,96420	1,06389	1,01598	1,04348	1,07629	1	0,93829
0,32484	1,11300	1,03500	1,02761	1,13386	1,08280	1,11210	1,14707	1,06577	1

1 Meridian = 40 Millionen Meter.

1 Meridiangrad = 111111 Meter.

Umfang des Aequators = 40 000000 × $1^1/_{300}$ = 40 133333 Meter.

1 Aequatorgrad = 111481 Meter.

1 englische Meile = 5280 Fuss engl.

1 Seemeile = 120 Knoten = 1851,85 Meter = $^1/_{60}$ Meridiangrad.

1 deutsche Meile = 7407,4 Meter = $^1/_{15}$ Meridiangrad.

1 geograph. Meile = 7432 Meter = $^1/_{15}$ Aequatorgrad.

Tabelle II. Vergleichung einiger Quadratfusse unter einander und mit dem Quadratmeter.

Quadrat-Meter.	Bayern, Q.-F.	Preussen, Dänemark, rheinl. Q.-F.	Oesterreich, Wiener Q.-F.	Württemberg, Hamburg, Q.-F.	Baden, Schweiz, Q.-F.	Hannover, Q.-F.	Sachsen, Q.-F.	Fngland, Russland, Q.-F.	Pariser Q.-F.
1	11,73960	10,15187	10,00739	12,18372	11,11111	11,72067	12,46936	10,76430	9,47682
0,08518	1	0,86475	0,85245	1,03783	0,94646	0,99839	1,06216	0,91692	0,80725
0,09850	1,15640	1	0,98577	1,20015	1,09449	1,15453	1,22828	1,06033	0,93350
0,09993	1,17309	1,01444	1	1,21747	1,11029	1,17120	1,24601	1,07564	0,94698
0,08208	0,96355	0,83323	0,82137	1	0,91196	0,96199	1,02344	0,88350	0,77783
0,09000	1,05656	0,91367	0,90067	1,09654	1	1,05486	1,12224	0,96879	0,85291
0,08532	1,00162	0,86615	0,85382	1,03951	0,94799	1	1,06388	0,91840	0,80856
0,08020	0,94148	0,81415	0,80256	0,97709	0,89107	0,93996	1	0,86326	0,76001
0,09290	1,09061	0,94311	0,92968	1,13186	1,03222	1,08885	1,15840	1	0,88039
0,10552	1,23877	1,07123	1,05599	1,28564	1,17245	1,23677	1,31578	1,13586	1

Frankreich, 1 Are = 100 Quadratmeter, 1 Hectare = 10000 Quadratmeter.
Bayern, 1 Tagwerk = 100 Decimalen = 40000 Quadratfuss bayer.
Preussen, 1 Morgen = 180 Quadratruthen = 180 × 144 Quadratfuss preuss.
Oesterreich, 1 Joch = 1600 Quadratklafter = 1600 × 36 Quadratfuss österr.
Württemberg, 1 Morgen = 384 Quadratruthen = 384 × 100 Quadratfuss württemb.
Baden, 1 Morgen = 400 Quadratruthen = 400 × 100 Quadratfuss bad.
Hannover, 1 Morgen = 120 Quadratruthen = 120 × 256 Quadratfuss hannov.
Sachsen, 1 neuer Acker = 640 Quadratruthen (1 Ruthe = 182 Zoll).
England, 1 Acre = 160 Quadratruthen (1 Ruthe = 16½ Fuss), 1 Hufe = 30 Acres.
Russland, 1 Dessätine = 2400 Quadratsaschen (1 Saschen = 3 Arschinen à 2½ Fuss).

Tabelle III. Verleichung einiger Cubikfusse unter einander und mit dem Cubikmeter.

Cubik-Meter.	Bayern. C.-F.	Preussen, Dänemark, rheinl. C.-F.	Oesterreich, Wiener C.-F.	Württemberg, Hamburg, C.-F.	Baden, Schweiz, C.-F.	Hannover, C.-F.	Sachsen, C.-F.	England, Russland, C.-F.	Pariser Cubik-Fuss.
1	40,22350	32,34587	31,65785	42,52752	37,03704	40,12627	44,03176	35,31658	29,17385
0,02486	1	0,80415	0,78705	1,05728	0,92078	0,99758	1,09468	0,87801	0,72529
0,03092	1,24354	1	0,97873	1,31477	1,14503	1,24054	1,36128	1,09184	0,90193
0,03159	1,27057	1,02173	1	1,34335	1,16992	1,26750	1,39086	1,11557	0,92154
0,02351	0,94582	0,76059	0,74441	1	0,87090	0,94354	1,03537	0,83044	0,68600
0,02700	1,08603	0,87334	0,85476	1,14824	1	1,08341	1,18886	0,95355	0,78769
0,02492	1,00242	0,80610	0,78896	1,05984	0,92301	1	1,09733	0,88014	0,72705
0,02271	0,91351	0,73461	0,71898	0,96584	0,84114	0,91130	1	0,80207	0,66256
0,02832	1,13894	0,91588	0,89640	1,20418	1,04872	1,13619	1,24677	1	0,82607
0,03428	1,37875	1,10873	1,08515	1,45773	1,26953	1,37542	1,50929	1,21056	1

Frankreich, 1 Kiloliter = 10 Hectoliter à 10 Decaliter à 10 Liter; 1 Liter = 1 Cubikdecimeter.
Bayern, 1 Scheffel = 222,36 Liter; 1 Klafter Holz = 126 Cubikfuss; 1 Maass = 0,043 Cubikfuss.
Preussen, 1 Scheffel = 54,96 Liter; 1 Klftr. Holz = 108 C.-F.; 1 Eimer = 2 Anker à 30 Quart à 64 Cubikzoll.
Oesterreich, 1 Metzen = 61,50 Liter; 1 Klftr. Holz = 108 C.-F.; 1 Eimer = 60 Maass à 0,0448 Cubikfuss.
Sachsen, 1 Scheffel = 105,14 Liter; 1 Klafter Holz = 108 Cubikfuss; 1 neue Kanne = 1 Liter.
England, 1 Bushel = 36,35 Liter; 1 Stecken Holz = 108 Cubikfuss; 1 Gallon = 4,54 Liter.

Tabelle IV. Vergleichung einiger Pfunde unter einander und mit dem Kilogramm.

Kilogramm.	Baden, Hannover, Preussen, Sachsen, Württemb., Schweiz, Zollpfund.	Bayern, Pfund.	Oesterreich, Wiener Pfund.	Preussen, alte Cöln. Pfund.	England, Pfund av. d. poids.	Russland, Pfund.	Dänemark, Norwegen, Pfund.	Schweden, Schalpfund.
1	2,00000	1,78571	1,78568	2,13807	2,20460	2,44189	2,00279	2,35106
0,50000	1	0,89286	0,89284	1,06904	1,10230	1,22094	1,00138	1,17553
0,56000	1,12000	1	0,99998	1,19732	1,23457	1,36747	1,12155	1,31660
0,56001	1,12002	1,00002	1	1,19735	1,23460	1,36750	1,12157	1,31662
0,46771	0,93542	0,83520	0,83518	1	1,03111	1,14211	0,93672	1,09962
0,45360	0,90720	0,81000	0,80998	0,96982	1	1,10764	0,90845	1,06644
0,40952	0,81903	0,73127	0,73125	0,87556	0,90282	1	0,82016	0,96278
0,49931	0,99862	0,89162	0,89160	1,06756	1,10078	1,21928	1	1,17391
0,42534	0,85068	0,75953	0,75952	0,90941	0,93770	1,03864	0,85186	1

Tabelle V. Verschiedene Einheiten für den Druck von Gasen und Dämpfen.

Kilogramm auf den Quadratmeter.	Pfund auf den Quadratzoll bayer. Duodec.	Pfund auf den Quadratzoll preuss.	Pfund auf den Quadratzoll österreich.	Pfund auf den Quadratzoll engl.	Centimeter Quecksilber.	Zoll Quecksilber bayer. Duodec.	Zoll Quecksilber preuss.	Zoll Quecksilber österreich.	Zoll Quecksilber engl.	Zoll Quecksilber Pariser.	Atmosphären, 760 mm Quecksilber-Säule.
1	0,001056	0,001368	0,001239	0,001422	0,007354	0,003024	0,002812	0,002797	0,002895	0,002717	0,00009676
946,7	1	1,296	1,173	1,346	6,962	2,862	2,662	2,648	2,741	2,572	0,09160
730,5	0,7716	1	0,901	1,039	5,376	2,210	2,056	2,045	2,118	1,987	0,07073
810,8	0,8564	1,110	1	1,153	5,936	2,441	2,270	2,258	2,338	2,194	0,07811
703,1	0,7427	0,963	0,867	1	5,171	2,126	1,977	1,966	2,036	1,910	0,06804
135,98	0,1436	0,1861	0,1685	0,1934	1	0,411	0,382	0,380	0,394	0,369	0,01316
330,7	0,3494	0,4524	0,4097	0,4704	2,432	1	0,930	0,925	0,958	0,899	0,03200
350,6	0,3756	0,4865	0,4406	0,5057	2,616	1,075	1	0,995	1,031	0,966	0,03441
357,6	0,3776	0,4891	0,4430	0,5084	2,629	1,081	1,006	1	1,037	0,971	0,03459
345,4	0,3649	0,4725	0,4280	0,4912	2,540	1,044	0,971	0,966	1	0,938	0,03342
368,1	0,3888	0,5035	0,4560	0,5233	2,707	1,113	1,034	1,029	1,066	1	0,03562
10334	10,92	14,14	12,80	14,70	76	31,25	29,06	28,91	29,92	28,08	1

Tabelle VI. Vergleichung einiger Fusspfunde unter einander mit dem Kilogrammmeter.

Kilo-gramm-meter.	Bayern, Fuss-pfund.	Preussen, Fuss-pfund.	Oester-reich, Fuss-pfund.	Württem-berg, Fuss-pfund.	Baden, Schweiz, Fuss-pfund.	Hannover, Fuss-pfund.	Sachsen, Fuss-pfund.	England, Fuss-pfund.
1	6,1184	6,3725	5,6490	6,9810	6,6667	6,8472	7,0623	7,2332
0,16344	1	1,0415	0,9233	1,1410	1,0896	1,1191	1,1543	1,1822
0,15692	0,9601	1	0,8865	1,0955	1,0462	1,0745	1,1083	1,1351
0,17703	1,0831	1,1281	1	1,2357	1,1802	1,2121	1,2502	1,2804
0,14324	0,8764	0,9128	0,8092	1	0,9550	0,9808	1,0116	1,0361
0,15000	0,9178	0,9559	0,8473	1,0472	1	1,0271	1,0594	1,0850
0,14596	0,8936	0,9301	0,8245	1,0189	0,9736	1	1,0308	1,0557
0,14159	0,8663	0,9023	0,7999	0,9885	0,9445	0,9701	1	1,0242
0,13825	0,8459	0,8810	0,7810	0,9652	0,9222	0,9472	0,9764	1
75	458,88	477,93	423,67	523,58	500,00	513,53	529,68	542,48

Alphabetisches Inhaltsverzeichniss.

(Die Ziffern bedeuten die Seitenzahlen.)

Abplattung der Erde 261. 579.
Abscheerung 529.
Absorbirende Brunnen 721.
Abstossende Molekularkräfte 38.
Aggregatzustände der Körper 10.
Aichen eines fliessend. Wassers 732.
Alkoholometer 653.
Allg. Eigenschaften d. Körper 2.
Amplitude der Schwingungen 273.
Amsler's Polarplanimeter 54.
Anemometer von Combes 740.
Angriffspunkt einer Kraft 46.
Ankeruhren 451.
Ansatzröhrchen, cylindrische 678.
— konische 682.
Anstrengung der Materialien 537.
Antrieb einer Kraft 241.
Appold's Centrifugalpumpe 805.
Aräometer, Gewichts- 650.
— Scalen- 650. 652.
Arbeit der Kräfte 48. 244.
— Nutz- 366. 509.
— Uebertragung derselben in einer Maschine 361.
Arbeitseinheiten 40.
Archimedisches Princip 638.
Artesische Brunnen 715.
Atmosphäre 596. 604.
— Höhe derselben 598.
Atmosphär. Dampfmaschine 902.
Atmosphär. Luft, Druck ders. 599.
Atome 8.
Atwood'sche Fallmaschine 218.
Auftrieb 639.
— eines Körpers in d. Luft 660.
Aufwerfhämmer 403.
Aufzugsmaschine 154.
Ausdehnbarkeit und Zusammendrückbarkeit 3.
Ausdehnung 2. 7.
— d. Gase durch d. Wärme 615.
— stabförmiger Körper 526.
Ausdehnungscoëfficient, linearer, cubischer 5. 6.
Ausfluss, constanter 694.
— intermittirender 694.
— einer Flüssigk. durch eine grössere Oeffnung in einer Seitenwand 684.
— einer Flüssigk. durch eine kleine Oeffnung 667.
— eines Gases d. e. Oeffn. 735.
Ausflusscoëfficient 673.
Ausflusscoëfficienten von Poncelet und Lesbros 686.
Ausflussmenge 671. 737.

Baggermaschinen 771.
Ballistisches Pendel 331.
Bandbremse 374.
Bandsägen 397.
Barometer 601. 605.
Barometerprobe 867.
Beaumé'sches Aräometer 653.
Bergwerkspumpen 801.
Berton's Windflügel 889.
Beschleunigte Bewegung 22.
Beschleunigung 22.
— des freien Falls, der Schwere 22. 226. 281.
— einer ungleichförmig beschleunigten Bewegung 251.
— Winkel- 299.
Bewegende Kraft 65. 235. 240.
Bewegung 1. 13.
— absolute 14. 32.
— allgemeine 17. 309.
— Arten derselben 15.
— beschleunigte, verzögerte 22.
— d. Flüssigk. in Röhren 699.
— der Gase in Röhren 737.
— der Himmelskörper 292.
— des Wassers in Flüssen 725.
— des Wassers in Kanälen 722.

Bewegung eines K. im Kreise 298.
— eines schweren Körpers auf einer krummen Linie 269.
— eines schweren Körpers auf einer schiefenEbene 267.
— Erzeugung u. Veränderung ders. durch d. Kräfte 213.
— flüs. u. luftförm. Körper 667.
— Fortpflanzung derselb. 314.
— fortschreitende 15. 213. 249.
— freie 252.
— geworfener Körper 282.
— gezwungene, unfreie 252.
— gleichförmig beschleunigte 22. 224. 227.
— gleichförmig periodische 20.
— gleichf. verzögerte 22. 230.
— gleichförmige 18.
— krummlinige 252.
— relative, scheinbare 14. 32.
— Richtung derselben 16.
— rotirende 16.
— um eine feste Achse 16. 298.
— um einen festen Punkt 16.
— ungleichförmige 21.
Bewegungsarbeit 65. 195. 201. 247. 366.
Bewegungsgrösse 241.
— eines rotirenden Körpers 305.
Bewegungskraft 309.
Biegung eines Stabes 531.
Biegungsweisen, verschiedene 538.
Birnbarometer 607.
Blasbälge, Küchenblasb. 872. 873.
— mit doppeltem Wind 873.
Bleiloth 37. 272.
Bodenstein 388.
Brahmapresse 810.
Bremsdynanometer 510.
Bremsen 374. 475.
— bei Eisenbahnen 498.
— von Laignel 499.
Briefwaage 137.
Bruchcoëfficient 537.
Bruchfestigkeit 535.
Brückenwaage 133.

Calorische Maschine 964.
Carnot's Princip 383.
Cavé's Hammer 398.
— Krahn 162.
Celsius'sches Thermometer 4.
Centrifugaleisenbahn 270.
Centrifugalkraft 253. 257.
Centrifugalkraft, Mitwirkung ders. bei der Drehung 307.
Centrifugalmaschine 258.
Centrifugalpumpe von Appold 805.
Centrifugalregulator 358. 937.
Centrifugaltrockenmaschine 264.
Centripetalkraft 253. 254. 257.
Circularsägen 397.
Cohäsionskräfte 38.
Combe's Anemometer 740.
Communicirende Gefässe 573. 620.
Componente 70.
Composante 70.
Compressionspumpen 872.
Compteur 740.
Condensator 906. 907. 941.
Constanter Ausfluss 694.
Constantes Niveau 624.
Contraction, unvollkommene 688.
— unvollständige 687.
— vollständige 685.
Contractions-Coëfficient 673.
Contractions-Querschnitt 672.
Cornwaller Dampfmasch. 908. 910.
Cornwall-Ventil 919.
Coulomb's Apparat für die Unters. der Gesetze des Reibens 340.
Coulomb's Apparat für die Unters. der Gesetze des Widerstands des Rollens 346.
Cubikeinheit 3.
Cylinderuhren 451.

Dachstuhl 193.
D'Alembert's Princip 309.
Dampf als Motor 895.
Dampfhämmer 403.
Dampfkammer 925.
Dampfkessel 944.
Dampfmaschine mit combinirten Dämpfen 963.
— m. oscillirend. Cylinder 944.
— von Cornwallis 910.
— von Newcomen 902.
— v. Watt, doppelt wirk. 922.
— — einfach wirk. 904.
— von Woolf 938.
Dampfmaschinen-Indicator 43. 955.
Dampfpfeifen 955.
Dampfpferd 61.
Dampfschiffe 964.
Dampfstrahlpumpe 977.
Dauer einer Schwingung des Pendels 273. 281.

Depressionskräfte 38.
Derivation der Geschosse 292.
Dichtigkeit 9.
Differentialflaschenzug 209.
Differentialwinde 206.
Doppelt wirkende Pumpe 795.
Drehende Bewegung 16.
— — um e. feste Achse 298.
Drehmoment 78.
Drehscheiben 487.
Drehungsachse, freie 307.
Drehzwilling 78. 92. 93.
Drops 504.
Drosselklappe 712.
Druck 39.
— auf den Boden 566.
— auf die Flächeneinheit 549.
— auf die Wände 556. 561.
— der atmosphär. Luft 599.
— einer bewegten Flüssigkeit gegen einen eingetauchten Körper 749.
— eines bewegten Gases auf einen Körper 751.
— eines Flüssigkeitsstrahls gegen eine Fläche 744.
— e. Körpers gegen seine Unterstützungspunkte 111.
— Fortpflanzung in flüssigen Körpern 545.
— Gleichheit desselben nach allen Richtungen hin 550.
— hydraulischer 705.
— in d. versch. Punkten innerh. e. Flüssigkeitsmasse 550.
— in schweren Flüssigk. 551.
— in schweren Gasen 593.
Druckintensität 528.
Druckpumpen 791.
Durand's Windmühlen 892.
Dynamik 69.
Dynamisches Pferd 61.
Dynamometer 41.
— Brems- 510.
— registrirende 56.
— Rotations- von Morin 45.
— — von White 45.
— totalisirende 57.
— von Poncelet 44.
— von Regnier 43.
Dynamometrische Kurbel 44.
— Schnellwaage von Hachette und White 157.

Ebbe und Fluth 581.
Echappement 438.
Eimer 781.
Eisenbahnen 476.
Eisenbahnräder 479.
Elasticität 11.
Elasticitätsgrenze 11. 529.
Elasticitätsmodulus 527. 530.
Elastische Flüssigkeiten 12.
Electricität als Motor 508.
Erdwinde 144.
Esel als Motor 520.
Excentrik 929.
Expansion, Clapeyron'sche 934. 969.
— des Dampfes 908.
— Meyer'sche 934. 940.
— veränderliche 939.
Expansionsarten, verschiedene 933.

Fahrenheit'sches Thermometer 4.
Fall der Körper 214. 221. 226.
— — in widersteh. Luft 752.
Fallhöhen u. Fallgeschwindigk. 227.
Fallmaschine, Atwood'sche 218.
— Morin'sche 232.
Fallschirm 753.
Feder als Motor einer Uhr 432.
Federn als Motoren 507.
Federwaage 41.
Feste Körper 10.
Festigkeit, Abscheerungs- 531.
— absolut rückwirkende 528.
— absolute Zug- 528.
— der Gefässe 543.
— der Materialien 525.
— relative oder Bruch- 535.
— Torsions- 541.
— Zerknickungs- 540.
Feuerspritze 797.
Feuerzeug, pneumatisch., Luft- 12.
Flächenmaass, Flächeneinheit 3.
Flaschenzug 140. 198.
— Differential- 209.
Fliehkraft 255.
Flüssige Körper 11.
Flüssigkeitswaagen 652.
Fortin's Reisebarometer 609.
Fortpflanzung der Bewegung 314.
— des Druckes in d. Gasen 593.
— — in flüss. Körpern 545.
Fourniersäge 392.
Freie Achse 307.
Frictionsrollen 153. 370.
Fusspfund 50.

Galilei's schiefe Ebene 217.
Gase 12.
— comprimirte als Motoren 508.
Gasometer 738.
Gasuhr 740.
Gay-Lussac'sches Gesetz 615.
Gay-Lussac's Reisebarometer 612.
Gebläse, Cylinder- 875.
Gebundene Wärme des Wasserdampfes 900.
Gefässbarometer 606.
Gegenpaar 78.
Gegenwinde 143. 206.
Gekuppelte Räder 495.
Gesättigter Dampf 896.
Geschützbohrer 428.
Geschützbohrmaschine 422. 425.
Geschützdrehbank 423.
Geschützhobelmaschine 423.
Geschützrohre, Anfertig. ders. 422.
Geschützverschraubmaschine 429.
Geschwindigkeit 19.
Geschwindigkeit d. Wassers, Messung derselben 728.
— eines Luftstroms, Messung derselben 740.
— mittlere 20. 21. 23. 29.
— — bei Flüssigk. 701. 731.
Geschwindigkeitscoëfficient 671.
Geschwindigkeitseinheiten, verschiedene 19.
Geschwindigkeitstabelle 23.
Gesetz der gleichmässigen Fortpflanzung des Drucks 549.
— der Trägheit 35.
Getreideputzmühle 876.
Gewicht 39. 100.
— als Motor 432. 507.
— der Gase 591.
— specifisches 9.
Gewichtseinheiten 40.
Giffard's Dampfstrahlpumpe 977.
Gleichförmig beschleunigte Bewegung 22. 224. 227.
— periodische Bewegg. 20. 21.
— verzögerte Bewegg. 22. 230.
Gleichförmige Bewegung 18.
Gleichgewicht 67.
— d. Kräfte an Holzverb. 192.
— eines in einem Punkt festgehaltenen Körpers 94.
— eines Körpers auf einer festen Ebene 97.
— e. K. mit fester Achse 95.
Gleichgewicht eines schweren Körpers, welcher auf einer horiz. Ebene aufruht 109.
— e. schweren K., welcher sich blos um eine horizontale Achse drehen kann 115.
— e. vollkommen freien K. 94.
— fester Körper 69.
— flüss. u. luftförm. Körp. 545.
— schwimmender Körper 643.
— stabiles und labiles 68.
— untergetauchter Körp. 642.
— von Kräften an Seilen oder Ketten 183.
Gleichgewichtsbedingungen, allgemeine 94.
Gleichgewichtsniveau der artesischen Brunnen 717.
Glocke, Aufhängeart der grossen —
Göpel 143. 519. 783.
Grenzfläche zweier Flüssigk. 571.

Haarröhrchen-Erscheinungen 589.
Hachette's dynamometr. Schnellwaage 157.
Haldat's Apparat für den Bodendruck 566.
Haltungen 656.
Hammer, Schwanz-, Aufwerf-, Stirn-, Quetsch-, Dampf- 403.
Hammer von Cavé 398.
Hammerwerke 398.
Handramme 406.
Haquet 174.
Haspel 143.
— Horn 143.
— mit Vorgelege 154.
— Rad- 143.
Hebebock 159. 160. 199.
Hebeisen 117.
Hebel 117.
— einarmiger 118.
— zweiarmiger 118.
Hebelarm 118. 120.
Hebelgesetz, allgemeines 121.
Hebelwerk von Imhof zur Bewegung d. Schiebebühnen etc. 490.
Heber, Saug- 691.
Heberbarometer 605.
Hemmung 438.
— Anker- 451.
— Chronometer- 454.
— Cylinder- 451.

Hemmung, freie 454.
— ruhende 444. 453.
— zurückspringende 440.
Heronsbrunnen 698.
Hochdruckmaschine 941.
Höhenmessen mit d. Barometer 608.
Holzverbindungen, Gleichgewicht der Kräfte an denselben 192.
Horizontalschub 193.
Hornhaspel 143.
Huyghens 443. 449.
Hydraulische Presse 557. 808.
Hydraulischer Druck 705.
— Widder v. Montgolfier 859.
Hydrostatische Waage 639.

Imhof's Hebelwerk 490.
Indicator, Dampfmasch.- 43. 955.
Injecteur 977.
Intermittirende Quellen 696.
Intermittirender Ausfluss 694.
— Brunnen 694.

Kaltwasserpumpe 928.
Kameele zum Einführen v. Schiffen in Häfen 655.
Kanäle 656.
Kanonenbohrmaschinen 425.
Kapillarerscheinungen 582.
Kapillarröhrchen 589.
Katarakt 916.
Kegelräder 155.
Kegelventil 786.
Keil 181.
Keilpresse 182.
Kepler'sche Gesetze 297.
Kesselstein 948.
Ketten 151.
Kettenbrücken 188.
Kettenräder 151.
Klappenventil 785.
Klingenfeld'sche Tafelwaage 212.
Kniee u. Verenggn. i. Röhren 711.
Kniepresse 86.
Körpermaass 3.
Kolben f. Dampfmaschinen 930.
— für Pumpen 786.
Konische Räder 155.
Kräfte, deren Richtungen sämmtl. in die näml. gerade Linie fallen 70.
— Maass derselben 41.
— nach verschied. Richtungen an versch. Punkten 87.
Kräfte n. verschied. Richtungen in dems. Angriffspunkt 78.
— parallele 72.
— sich kreuzende 88.
Kraft 36.
— bewegende 65. 235. 240.
— mittlere Grösse derselb. 57.
— Richtung u. Angriffspunkt derselben 46.
— widerstehende 65.
Kraftmaschine 508.
Kraftmesser 42.
Krahn, Lauf- 168.
— transportabler 166.
— von Cavé 162.
Kreisbewegung 297.
Kufenrad 831.
Kugelventil 786.
Kunstgestänge 802.
Kunstramme 408.
Kurbelbewegung 352.

Labiles Gleichgewicht 68.
Lactometer 653.
Länge, reducirte des zusammengesetzten Pendels 280. 306.
Längenmaass, Längeneinh. 2. 3.
Lärmschwimmer 954.
Läufer 388.
Laignel's Bremse 499.
Laterne 156.
Laufbohrmaschine 422. 430.
Laufkrahn 168.
Laufrad 143.
Lebendige Kraft 246.
— Potenz 244.
— — eines rotir. Körp. 305.
— — Princ. d. Erh. d. 301.
Leerrolle 149.
Leistungsfähigkeit, theoret. 508.
Leitkurven 836.
Leitrollen 152.
Leitschaufeln 836.
Liderung für Pumpenkolben 786.
Löffelrad 830.
Lokomobilen 976.
Lokomotive 493. 965.
Luftballon 661.
Luftfeuerzeug 12.
Luftförmige Körper 12.
Luftpumpe 864.
— bei Dampfmasch. 913. 927.
Luftschifffahrt 764.
Luftwechsel in Bergwerken 632.

Maass, Längen-, Flächen-, Körper- 2. 3.
Magdeburger Halbkugeln 601.
Mahlmühlen 385.
Manometer 43. 625.
— mit freier Luft 625. 951.
— m. verdichteterLuft 626. 950.
— von Bourdon 952.
— von Schäffer und Budenberg 953.
Mansardendach 194.
Mariotte'sches Gesetz 613.
Maschinen 1.
— im Zustande der gleichförm. Bewegung 195.
Maschinen in ungleichförm. Bewegung 352.
— unter dem Gesichtspunkt d. Gleichg. d. Kräfte, welche auf sie wirken 116.
— welche zur Bewegung der Gase dienen. 863.
— z. Heben d. Flüssigk. 767.
Masse eines Körpers 240.
Mechanik 1. 13.
— fester Körper 13.
— flüssiger u. luftf. Körper 545.
Mensch als Motor 515.
Metacentrum 647.
Metallkolben 930.
Metallmanometer 952.
Methode d. doppelten Wiegung 133.
Metrisches Maasssystem 3.
Mittelkraft 69.
Mittelpunkt d. parallelen Kräfte 76.
— der Massen 214. 250.
— des Drucks 563.
— des Stosses 298.
Moleküle 8.
Molekularkräfte, attractive und repulsive 37. 38.
Morin's Apparat für die Unters. der Gesetze des Reibens 341.
— dynamometrische Kurbel 45.
— Fallmaschine 232.
— Rotationsdynamometer 45.
Motoren, allgem. Betrachtgn. 507.
— hydraulische 816.
— thierische 39. 507. 514.
Mühlen, Mahl- 385.
Mühlsteine 386. 390.
Münzbalancier 412.
Münzpresse von Uhlhorn 412. 418.
Münzschwengel 412.

Noria 771.
Normalkraft 252. 253. 258.
Nutzarbeit 366. 509.
Nutzeffekt 366. 509.
Nutzleistung 509.
Nutzwiderstände 366.
Newcomen's Dampfmaschine 902.
Newton's Princip der gleichen Wirkung u. Gegenwirkung 48.

Oberfläche einer schweren Flüssigkeit 558.
Oberflächen-Geschwindigkeit und mittlere 732.
Ochse als Motor 520.
Oerstedt's Piezometer 627.
Oscillirende Maschine 944.
Otto von Guerike 601. 869.

Parabel als Wurflinie 285. 288.
Parallele Kräfte 72.
Parallelogramm der Kräfte 78.
Parallelschraubstock 180.
Pascal's Haquet 175.
— hydraulische Presse 557.
Passive Widerstände 338. 365.
— — Mittel zu ihrer Verminderung 368.
— — Mittel zu ihrer Vergrösserung 374.
Paternosterwerk 769.
Pendel 272.
— als Uhrregulator 443.
— ballistisches 331.
— einfaches, mathemat. 279.
— Reversions- 281.
— zusammengesetztes 279. 306.
— — reducirte Länge desselben 280. 306.
PeriodischeRotationsbewegung 26.
Perpetuum mobile 196. 520.
Pferd als Motor 519.
Pferdekraft 58.
— versch. Einheiten ders. 59.
Piezometer von Oerstedt 627.
Planimeter 53.
Pneumatische Schraube 879.
Pneumatisches Feuerzeug 12.
Pochwerke 403.
Polarplanimeter von Amsler 54.
Ponceletrad 827.
Poncelet's Dynamometer 44.
Poncelet und Lesbros' Ausflusscoëfficienten 686.

Porosität 8.
Prägmaschine 412.
Presse, hydraulische 557. 808.
Princip Carnot's 383.
— d'Alembert's 309.
— der Erhaltung d. Bewegung des Schwerpunkts 311.
— d. Erh. d. lebend. Potenz 310.
— der gleichen Wirkung und Gegenwirkung 47.
— d. Uebertragung d. Arb. 364.
— der virtuellen Geschwindigkeit 197.
— des Copernikus 31.
Prony's Formel für die Geschwindigk. d. Wassers i. Röhren 702.
Prony'scher Zaum 510.
Pumpe Centrifugal, 805.
— doppelt wirkende 795.
— Druck- 791.
— Rotations- 800. Saug- 787.
— Saug- u. Druck- od. Hub- 792. 793.
Pumpen 782. Bergwerks- 801.

Quetschhämmer 403.
Quintenz'sche Waage 133.

Rad an der Welle 141.
Radhaspel 143.
Radschuh 476.
Räder, gekuppelte 495.
Rammbär 408.
Rammen 406.
— Hand- 406, Kunst- 408.
— Zug- 407.
Reaction d. ausfliess. Wassers 832.
Reactionsräder 832. 833.
Réaumur'sches Thermometer 4.
Regnier's Dynamometer 43.
— dynamometrische Kurbel 45.
Regulator, bei Lokomotiven 975.
Reibung, wälzende 338. 346.
— gleitende 338. 339.
— — Gesetze ders. 343.
Reibungscoëfficient 345.
Reibungscoëfficienten f. gleitende Reibung 345.
— für wälzende Reibung 348.
— für Zapfenreibung 346.
Reisebarometer von Fortin 609.
— Gay-Lussac 612.
Resultante 70.
Resultantengeschwindigkeit 29.
Reversionspendel 281.
Riemen ohne Ende 148.
Riemenrollen 149.
Roberval'sche Waage 210.
Rolle 138. Rolle, feste 138.
Rolle, lose 139. 198.
Rotationsbewegung 16. 24.
— periodische 26.
Rotationsdynamometer v. Morin 45.
— von White 45.
Rotationspumpe 800.
Rückwirkende Festigkeit 528.
Ruhe 1. 13. Ruhe, absolute 14.

Saccharometer 653.
Sägewerke 392. 397. 498.
Saug- und Druckpumpe 792.
— und Hubpumpen 793.
Saugheber 691
Saugmaschinen 870.
Saugpumpen 787.
Saumlatte 884.
Scheinbare Bewegung 32.
Schiebebühnen 489.
Schieber 925. 932.
Schiefe Ebene 170. 200. 267.
— — selbstwirkende 502.
— — von Galilei 217.
Schienen, Eisenbahn- 477.
Schienenräumer 975.
Schiffe, Fortbewegung ders. m. Ruder, Räder u. Schrauben 756.
Schiffe und Kähne 654.
Schiffsschraube 759.
Schildzapfendrehbank 424.
Schlagwerk einer Uhr 460.
Schleuder 255.
Schleusen 656.
Schnecke einer Uhr 434.
Schnellwaage 136.
Schöpfräder 778.
— fränkische 779.
Schornsteine 635.
Schraube 176.
Schraube ohne Ende 206.
Schraubengewinde, scharfes, flaches 176.
Schraubenpresse 204.
Schraubenwinde 180.
Schraubstock, Parallel- 180.
Schrotleiter 175.
Schubkarren 119. 468.
Schusstabellen 292.
Schwanzhammer 402.

Schwere 36. Schwerkraft 36.
Schwerpunkt, Begriff dess. 100.
— einer ebenen Fläche 104.
— einer Kugel 103.
— einer Pyramide 107.
— eines Cylinders 103.
— eines Dreiecks 104.
— eines ebenen Vielecks 107.
— eines homogenen Körpers mit einem Mittelpunkt 103.
— eines Kegels 108.
— eines Körpers, d. aus mehr. Theilen besteht 105.
— eines Parallelepipeds 103.
— eines Prisma's 107.
— eines Rings 103.
— Princip der Erhaltung der Bewegung desselben 311.
Schwerpunktsbestimmung, durch den Versuch 101.
— mittelst d. Geometrie 103.
Schwimmende Körper 643.
Schwimmer 954.
Schwimmfläche eines Schiffes 655.
Schwinden der Körper 7.
Schwingungsdauer 273. 281.
— Reduction auf unendlich kleine Bögen 279.
Schwingungsmittelpunkt 280. 306.
Schwungrad 305.
— Wirkung desselb. b. Uebertragung der Arbeit 364.
Schwungradius 306.
Secundenpendel, Länge dess. 281.
Segelschiffe 882.
Segner'sches Wasserrad 833.
Seile oder Ketten, Gleichgewicht der Kräfte an denselben 183.
Seilpolygon 183.
Seitengeschwindigkeiten 29.
Seitenkräfte 69.
Selbstspanner 932.
Senkel 37.
Senkwaagen 652.
Setzlatte 37.
Setzwaage 37.
Sicherheitsventil 121. 949.
Simpson'sche Regel 53.
Spannrollen 152.
Spannung, Spannkraft 39.
— in einem Punkte einer Flüssigkeit 591.
Spannungsintensität 527.
Specifisches Gewicht 9.
Specifisches Gewicht fester Körper, Best. dess. mittelst des Archimed. Princ. 648.
— — Tabelle 9.
Speisepumpe 913. 928. 938. 975.
Springbrunnen 713.
Sprossenrad 146. 518.
Spurkranz 479. Spurweite 477.
Stabiles Gleichgewicht 68.
Stampfwerke 403.
Standfestigkeit 122.
Starre Körper 47. Statik 69.
Statisches Moment 118.
Steifigkeit der Seile 338. 349.
Steigrad 439.
Stephenson'sche Coulisse 940. 973.
Steuerruder, Wirkung desselben bei Schiffen 754.
Stirnhämmer 403. Stirnräder 153.
Stoss, bes. Wirkungen dess. 335.
— centrischer 317.
— Verlust an Arb. d. dens. 380.
— zweier Körper 316. 380.
— zwischen K., welche sich um feste Achsen drehen 331.
Stosslinie 329.

Tabellen: 1) Vergleichung versch. Thermometerscalen 5.
2) Ausdehn.-Coëffic. für 1° C. 6.
3) Spec. Gewichte bei 0° C. 9.
4) Geschwindigkeitseinheiten 19.
5) Mittlere Geschwindigkeiten 23.
6) Verschiedene Einheiten für die Winkelgeschwindigkeit 26.
7) Vergl. versch. Pferdekräfte 59.
8) Fallhöhen u. Fallgeschwindigkeiten 227.
9) Beschleunigung d. Schwere u. Länge d. Secundenpendels 281.
10) Reibungscoëfficienten für gleitende Reibung 345.
11) Reib.-Coëff. f. Zapfenreib. 346.
12) — — f. wälzende Reib. 348.
13) Widerstandscoëfficienten der Fuhrwerke 472.
14) Erfahrungsresultate über die Elasticität und Festigkeit der Materialien 530.
15) Trägheitsmomente u. Abstände d. Schwerpunktsfaser von der obersten und untersten 534.
16) Hodgkinson's Formeln für die Zerknickungsfestigkeit 540.

Tabellen: 17) Ausflusscoëfficienten von Poncelet u. Lesbros 686.
18) do. do. 686.
19) Factoren f. d. Ausfl.-Coëff. 689.
20) Mittlere und Oberflächengeschwindigkeit 732.
21) Temperatur u. Spannkraft des Wasserdampfes 899.
22) Spannkraft u. Temperatur des Wasserdampfes 900.
23) Gebund. u. gesammte Wärme des Wasserdampfes 901.
24) Vergleichung der vom Dampfe ohne und mit Anwendung der Expansion geleist. Arbeit 910.
I. Vergleichung einiger Längenfusse unter einander u. mit dem Meter 981.
II. Vergl. einig. Quadratfusse unter einander und mit dem Quadratmeter 982.
III. Vergl. einiger Cubikfusse unter einander und mit dem Cubikmeter 983.
IV. Vergleichung einiger Pfunde unter einander und mit dem Kilogramm 984.
V. Versch. Einheiten f. d. Druck von Gasen und Dämpfen 985.
VI. Vergl. einiger Fusspfunde unter einander und mit dem Kilogrammmeter 986.
Tafelwaage von Klingenfeld 212.
Tag, Sonnen-, Stern- 18.
Tangentialkraft 252.
Taucherkolben 803.
Tender 975.
Theilbarkeit 7.
Thermometer 4.
Thermometerscalen 4. 5.
Thierische Motoren 39. 507. 514.
Tonnengehalt eines Schiffes 654.
Toricelli's Gesetz 668.
— Versuch 603.
Torsionsfestigkeit 541.
Totaleffekt 508.
— einer Wasserkraft 815.
Trägheit, Gesetz der 35.
Trägheitskraft 309.
Trägheitsmoment 301.
Transport auf geneigter Bahn 473.
— auf Rädern 467.
— direkter, durch Menschen oder Thiere 464.
Transport durch Gleiten 465.
— durch Wälzen 466.
— von Lasten 463.
Tretrad 143.
Tretscheibe 143.
Trieb 153.
Tropfbar flüssige Körper 11.
Turbine, schottische 833.
— von Callon 839.
— von Fontaine 840.
— von Fourneyron 834.
— von Henschel 842.
— von Jonval 842.
— von Köchlin 842.
— von Whitelaw 833.
Turbinen, hydropneumatische 844.
Tympanum 780.

Ueberfall 690. 814.
Ueberhitzer 962.
Ueberhitzter Dampf 897.
Ueberhöhung der Schienen 481.
Uhren 431.
— Anker- 451.
— Cylinder- 451.
Ungleichförmige Bewegung 21.
Unruh 438.
Unzusammendrückb. Flüssigk. 11.

Ventilatoren 876. 877. 878.
Veränderte Bewegung 21.
Vertikale 36. 581.
Verzahnungen 152.
Verzögerte Bewegung 22.
Virtuelle Geschwindigkeit 197.
Volumen 3.
Voreilung 933.
Vorgeleghaspel 154.

Waage 125, Brief- 137.
— Brücken- 133.
— Empfindlichkeit ders. 128.
— gleicharmige 126.
— hydrostatische 639.
— Klingenfeld'sche Tafel- 212.
— Quintenz'sche 133.
— Roberval'sche, Strassb. 210.
— Schnell- 136.
— Tragkraft derselben 132.
— Zeiger- 137.
Wägen, als Transportmittel 467.
— Eisenbahn-, gegliederte von Arnoux 482.
— Standfestigkeit ders. 469.

Wärme als Motor 508.
Wagenwinde 157. 198.
Wasser als Motor 507. 814.
Wasserdampf, Eigensch. dess. 896.
— gebund. Wärme d. 900. 901.
— gesättigter 896.
— Tabelle über Temperatur u. Spannkraft dess. 899. 900.
— überhitzter 897.
Wassergefäll, Herstellg. dess. 814.
Wasserkraft, Totaleffekt ders. 815.
Wassermesser 734.
Wasserrad, Anlage e. solchen 847.
— frei in e. Fluss hängend 829.
— mittel- od. rückenschl. 825.
— oberschlächtiges 822.
— Segner'sches 833.
— unterschlächtiges m. ebenen Schaufeln 819.
— von Poncelet 827.
Wassersäulenmaschine, doppelt wirkende 855.
— einfach wirkende 848.
Wasserschraube, archimed. 772.
— holländische 775.
Wasserstandsglas 954.
Wassertrommelgebläse 880.
Wasserzoll 807.
Watt's doppelt wirk. Dampfm. 922.
— einfach wirk. Dampfm. 904.
Watt'sches Parallelogramm 920.
Wechsel 485.
Weg 15.
Wehre 690. 814.
Wellrad 142.
Wetterofen 635.
White's dynam. Schnellwaage 157.
— Rotationsdynamometer 45.
Widerstände, Nutz- 366.
— passive 338. 365.
— — Mittel zu ihrer Verminderung 368.
— — M. z. i. Vergrösserg. 374.
Widerstand der Luft beim Fall der Körper 752.
— des Gleitens 338.
— des Mittels 339. 350.
— des Rollens 338. 346.
Widerstandsarbeit 65. 195. 201. 247.
Widerst.-Coëff. d. Fuhrwerke 472.
Widerstehende Kraft 65.
Wind als Motor 507. 882.
Windbüchse 872.
Winde 143.
Winde, chinesische 143. 206.
— Erd- 144.
— Gegen- oder Differential- 143. 206.
— Schrauben- 180.
— stehende 143.
— Wagen- 157. 198.
Windflügel 884.
— von Berton 889.
Windkessel bei Feuerspritzen 798.
Windmesser 740.
Windmühle 884.
— von Amédée Durand 892.
Winkelbeschleunigung 299.
Winkelgeschwindigkeit 24.
— mittlere 27.
— versch. Einheiten ders. 26.
Winkelhebel 119. 197. 200.
Winkelräder 155.
Wirkungsgrad 366. 509.
Wirteln 151.
Woltmann'scher Flügel 728.
Woolf'sche Maschine 938.
Wurf, schiefer 282.
— senkrechter 228.
Wurfrad 776. Wurfweite 288. 289.

Zahnräder 152.
Zahnstange 156. Zapfenreibung 345.
Zeigerwaage 137.
Zeit, Sonnen-, Stern- 18.
Zellenrad 823.
Zerknickungsfestigkeit 540.
Zerlegung der Kräfte 69.
Ziehen der Läufe 430.
Zug 39.
Zug in den Schornsteinen 635.
Zugfestigkeit 528.
Zugkraft zur Fortbewegung eines Wagens 471.
Zugramme 407.
Zusammendrückbarkeit 3.
— d. tropfbaren Flüssigk. 627.
Zusammendrückung kurzer stabf. Körper 528.
Zusammensetzung mehr. gleichzeitiger Bewegungen 27.
— u. Zerlegung d. Kräfte 69.

Druck von C. R. Schurich in München.

1867.

Bauschinger, Johann,

Die Schule der Mechanik für den Selbstunterricht, besonders des praktischen Mechanikers und Handwerkers, sowie für den Gebrauch an technischen Lehranstalten gemeinfaßlich dargestellt und mit Zugrundelegung von Delaunay's 'Elementarbuch der theoretischen und angewandten Mechanik'

München 1866

Bamberg, Staatsbibliothek -- Mech.o.5
urn:nbn:de:bvb:12-bsb11740622-9